This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

CHARLES BELLENS

TRAITÉ
DES
CHAUDIÈRES A VAPEUR

PARIS
CH. BÉRANGER EDITEUR

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

DES

CHAUDIÈRES A VAPEUR

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

DES

CHAUDIÈRES A VAPEUR

ÉTUDE SUR LA VAPORISATION

DANS LES APPAREILS INDUSTRIELS

PAR

CHARLES BELLENS
Ingénieur

Avec 215 figures dans le texte.

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MÊME MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1895
Tous droits réservés.

Digitized by Google

Digitized by Google

64473
AUG 12 1902
THN
.B41

6951957

AVANT-PROPOS

L'auteur ayant été appelé à diriger plusieurs grandes installations mécaniques et à étudier la marche d'un assez grand nombre de moteurs à vapeur, s'est souvent trouvé embarrassé par des questions relatives à la construction des chaudières et aux phénomènes qui accompagnent leur fonctionnement.

Il n'a pas trouvé de renseignements satisfaisants dans les ouvrages spéciaux et il a dû faire des expériences assez compliquées pour élucider les points qui lui paraissaient obscurs dans la théorie de l'évaporation et de l'ébullition en vase clos.

L'idée de ce livre est née de ces études et de ces expériences. Elle est née également de diverses réflexions devant être exposées succinctement pour faire bien comprendre le but qu'il désire atteindre.

Depuis un siècle, c'est-à-dire depuis qu'elle a été revêtue d'une forme réellement industrielle, la machine à vapeur a été l'objet de recherches non interrompues, lesquelles par perfectionnements successifs ont abouti à la création de moteurs consommant, en service courant, moins d'un kilogramme de charbon par cheval et par heure.

Des deux principaux appareils constituant la machine à

Digitized by Google

vapeur : le générateur et le récepteur, ce dernier seul a reçu de très notables améliorations ; l'autre a été sinon tout à fait négligé, du moins étudié d'une manière plus superficielle, comme présentant un moindre intérêt.

Cette différence tient à ce que, dès les travaux immortels de Watt, la vapeur engendrée dans les chaudières contenait environ la moitié des calories renfermées dans le charbon brûlé, tandis que les récepteurs ou machines à vapeur proprement dites n'utilisaient guère que le vingtième du calorique de la vapeur consommée.

Tout naturellement les ingénieurs ont préféré rechercher les moyens de diminuer la quantité de vapeur absorbée par les machines au lieu de s'attacher à augmenter le rendement des chaudières.

Il en résulte que, depuis Watt, le rendement des machines a plus que triplé, alors que celui des chaudières n'a augmenté que d'un quart au maximum.

Aujourd'hui on construit des machines utilisant 18 p. 100 de l'énergie de la vapeur employée, et des chaudières ayant 65 p. 100 de rendement en eau vaporisée. Le rendement final allant de l'énergie calorifique du charbon brûlé à l'énergie mécanique recueillie sur la poulie motrice de la machine à vapeur, est donc d'environ 12 p. 100.

L'étude des machines a été singulièrement facilitée par les indicateurs donnant des tracés rigoureux de la détente, de la compression et des moments précis où commencent et où se terminent l'admission et l'échappement de la vapeur. Les phénomènes qui accompagnent la transformation de la chaleur en travail sont ainsi devenus tangibles et par suite aisément perfectibles dans plusieurs de leurs manifestations.

En ce qui concerne les chaudières, on a longtemps supposé qu'il suffisait de faire du feu sous un récipient métallique

Digitized by Google

contenant de l'eau, et d'étendre suffisamment les surfaces chauffées afin de refroidir convenablement les produits de la combustion, pour obtenir le maximum d'effet utile. On retrouve dans la plupart des chaudières actuelles, les types établis il y a cinquante ans avec des variantes les mettant en harmonie avec les moyens de fabrication dont dispose l'industrie de nos jours, mais laissant subsister intacts les principes qui ont présidé à leur création.

On n'a jamais essayé de voir ce qui se passe dans une chaudière en feu. On ne s'est même pas préoccupé de vérifier si l'eau était toujours en contact avec les surfaces directement exposées à l'action des flammes. Les spécialistes se sont surtout ingéniés à bien brûler le combustible et à rechercher les moyens d'éviter les explosions. En cela ils avaient raison : Sécurité et économie : tout le programme des inventeurs doit se limiter à ces deux objectifs, en mettant le premier fort au-dessus du second.

Il faut d'ailleurs reconnaître que la seule question *sécurité* a presque exclusivement guidé les travaux des ingénieurs et des constructeurs, et remarquer que presque tous ont cru pouvoir assurer cette sécurité par le choix des matériaux, l'épaisseur des tôles et l'assemblage des parties essentielles de l'appareil.

Les résultats n'ont pas toujours répondu à leurs prévisions, mais des progrès sérieux sont acquis dans la fabrication.

C'est encore pour diminuer les risques d'accidents qu'ont été fondées les Associations de propriétaires d'appareils à vapeur : on a voulu obtenir par ces excellentes créations la sécurité absolue que se refusait de donner l'art du constructeur. Le succès n'a pas été complet et il ne pouvait l'être, par cette raison qu'on ne s'attachait partout et toujours qu'à combattre les effets du mal au lieu d'en étudier les véritables causes.

Digitized by Google

Lors de l'apparition des chaudières multitubulaires, un un grand courant s'est dessiné en leur faveur : elles répondaient à un véritable besoin industriel ; car elles tenaient peu de place et se vendaient à bon marché ; puis on les disait inexplosibles, ce qui contribuait puissamment à leur succès.

Certes, leur emploi évite les désastres terribles dus aux effets dynamiques d'un volume d'eau considérable, mais il ne donne pas la sécurité au personnel : le nombre des accidents de personnes, disent les statistiques, ayant doublé depuis leur introduction générale dans l'industrie.

On considère trop le générateur de vapeur comme un appareil nécessaire, mais encombrant, sale et dangereux. Le séjour de la chambre de chauffe, étant loin d'être agréable, est le plus souvent abandonné aux soins d'ouvriers peu intelligents et peu soigneux, surtout en France où le métier de chauffeur est considéré comme étant d'ordre inférieur, très peu au-dessus de celui de manœuvre.

Ce qui a le plus retardé les progrès sérieux dans les chaudières, ce sont les théories émises pour expliquer les explosions. Théories inexactes, acceptées par la masse des constructeurs et servant encore aujourd'hui de base aux calculs des tôles, à l'étude des principaux organes de sécurité et aux règlements imposés aux chauffeurs pour la conduite des générateurs à vapeur.

M. Vinçotte, l'ingénieur belge dont la réputation est européenne, a combattu dès 1878 la théorie des explosions, basées sur l'état sphéroïdal de l'eau. Malgré l'autorité de son nom et les explications rationnelles de sa thèse, M. Vinçotte n'est pas parvenu à triompher de cette lourde erreur qui n'a commencé à être mise en doute qu'après les démonstrations expérimentales de M. Lavington E. Fletcher, ingénieur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur de Manchester.

Digitized by Google

La relation des travaux de M. Fletcher, publiée en 1891, est accompagnée d'observations de la plus grande importance qui contredisent les idées généralement répandues sur la circulation de l'eau dans les chaudières à foyers intérieurs.

Ces réfutations victorieuses de deux erreurs professées par les sommités techniques du monde entier n'ont pas reçu tout d'abord l'accueil qu'elles méritaient ; elles sont même encore ignorées d'un grand nombre d'ingénieurs et de constructeurs français.

De son côté, M. Dubiau, ingénieur-directeur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du sud-est, a eu l'occasion de constater, sur les chaudières à bouilleurs, des faits démontrant que la vaporisation dans ces appareils est accompagnée de phénomènes autres que ceux enseignés par nos meilleurs professeurs.

L'auteur lui-même a entrepris des expériences sur les chaudières multitubulaires et a reconnu qu'il existait entre les constatations de MM. Vinçotte, Fletcher, Dubiau et les siennes, une très grande analogie. Ce fait l'a engagé à compléter ses travaux par une étude générale et complète de la vaporisation dans les chaudières et à les publier sous forme de traité.

La lecture de ce traité montrera que la chaudière à vapeur est un appareil beaucoup plus complexe et beaucoup plus délicat que la machine la plus parfaite, et qu'il a encore besoin de grands perfectionnements pour devenir très économique et tout à fait inoffensif.

Paris, le 25 avril 1895.

Digitized by Google

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS V

CHAPITRE PREMIER

ÉBULLITION A L'AIR LIBRE

Evaporation 1
Ebullition. — Vaporisation 2
Température d'ébullition de l'eau 3
Formation des bulles de vapeur 4
Théorie de l'ébullition, forme particulière de l'évaporation 5
Forme et chemin des bulles de vapeur 7
Cause du mouvement des bulles de vapeur. 8
Mouvements d'une masse d'eau en ébullition 9
Cause des mouvements d'une masse d'eau en ébullition 11
Influence de l'étendue de la surface libre. 11
Chaleur latente de vaporisation 13
Rôle des phénomènes capillaires dans l'ébullition 14
Tension superficielle. 15
Causes de la tension superficielle 16
Expérience de de Romilly. 17
Caléfaction. — Etat sphéroïdal. 18
Expériences de Boutigny, Faraday, Poggendorff. 19
Expérience de M. Hirsch 20
Expérience de Boutigny. 21
Rôle des phénomènes capillaires dans la caléfaction. 22
Phénomène de la surchauffe. 23
Expérience de Donny. 24
Expérience de Galy-Galazat. 25
Expériences de Dufour 25
Phénomènes des geysers. 25

Digitized by Google

CHAPITRE II

ÉBULLITION EN VASE CLOS

Température d'ébullition en vase clos 29
Limite de l'état liquide en vase clos. 29
Marmite de Papin. 31
Vapeur saturée. 32
Mesure de la tension de la vapeur d'eau saturée. 33
Vitesse de dégagement d'une bulle de vapeur. 36
Considérations de Péclet sur l'ébullition en vase clos 36
Remarque sur les considérations de Péclet 38
Impossibilité de l'état sphéroïdal en vase clos. 39
Expérience de M. Witz 40
Causes empêchant le contact de l'eau et du métal. 43
Mesure de la tension superficielle 44
Effets de la tension superficielle de l'eau. 44
Surchauffe des parois. 46
Emulsion 47
Mousse. — Ecume. 47
Matelas de vapeur 49
Parois de coup de feu. 50
Influence des sels en dissolution dans l'eau. 51
Formation des dépôts 53
Emploi des eaux de condensation par surface. 55
Corrosion par l'eau distillée. 56

CHAPITRE III

SOULÈVEMENTS ET ENTRAÎNEMENTS D'EAU

Soulèvements de la masse d'eau. 58
Expérience de Perkins 58
Observations de M. Farcot 59
Fuites au foyer 59
Expérience de Bourne 60
Observations de M. Dubian 60
Soulèvements dans une chaudière semi-tubulaire. 61
Analogie des soulèvements avec le phénomène des geysers. 62
Distinction entre les soulèvements et les entraînements d'eau. 62
Entraînements. 63
Quantité d'eau entraînée 63
Remarques de M. Stromeyer. 64
Vaporisations apparentes et réelles. 65
Dispositifs employés pour atténuer les effets des entraînements. 65
Propriété des parois froides. 67
Détendeurs par étranglement 68

Digitized by Google

Surchauffe de la vapeur 69
Périodes d'entraînement 70
Veines d'entraînements. 71
Choix de la prise. 71
Mesure des entraînements 71
Méthode du sel. 72
Critique de la méthode du sel. 72
Méthode du calorimètre 73
Méthode de la condensation totale. 74
Alimentation dans la vapeur. — Ses avantages 75

CHAPITRE IV

TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Généralités sur la chaleur. 77
Chaleur spécifique. — Calorie. 79
Equivalent mécanique de la chaleur 80
Conductibilité relative des corps solides 82
Loi de la conductibilité. 82
Conductibilité absolue des corps solides 83
Transmission par contact. 84
Transmission par rayonnement 84
Vitesse de refroidissement. 85
Pouvoirs émissifs relatifs des corps solides 86
Formules de Peclet. 87
Formules de Dulong et Petit 87
Valeurs de K et de K'. 88
Valeurs de R. 89
Valeurs de A. 90
Quantité de chaleur émise 91
Considérations sur les formules de Dulong et Petit 92
Quantités de chaleur absorbées 92

CHAPITRE V

PUISSANCE DE VAPORISATION DES SURFACES DE CHAUFFE

Absorption de la chaleur dans les chaudières 95
Surface de chauffe directe et indirecte 96
Influence de l'épaisseur du métal 96
Chaleur spécifique des gaz de la combustion 98
Températures théoriques dans les foyers 98
Mesures expérimentales de la production des surfaces de chauffe 99
Formule de M. Stromeyer. 101
Expériences de M. Hirsch 102
Expériences de M. Durston 106

Digitized by Google

Remarques sur les expériences de M. Witz 109
Mesures expérimentales de la quantité de chaleur émise. 110
Limite de l'étendue des surfaces de chauffe. 111
Expériences de MM. Hutton et Yarrow sur la transmission de la chaleur. 112

CHAPITRE VI

TEMPÉRATURES DES SURFACES DE CHAUFFE

Expériences de M. Hirsch. 113
Expériences de M. Yarrow 118
Expériences de M. Durston. 118
Remarques sur les expériences de MM. Hirsch et Durston 124
Disposition rationnelle des surfaces de chauffe. 126

CHAPITRE VII

ABSORPTION DE LA CHALEUR PAR L'EAU

Conductibilité des fluides 128
Transmission de la chaleur dans les fluides par convection. 129
Influence de la couche immobile. 131
Expériences de M. Hagemann. 132

CHAPITRE VIII

CIRCULATION DE L'EAU

Transmission méthodique de la chaleur 137
Expériences de Williams 138
Expériences de Perkins. 139
Pouvoirs absorbants de l'eau et de sa vapeur. 142
Efficacité de la circulation de l'eau. 144

CHAPITRE IX

APPAREILS PRODUISANT LA CIRCULATION DE L'EAU

Aperçu historique 146
Turbine de brassage de M. Garnier 148
Émulseur de vapeur de M. Dubiau. 149

CHAPITRE X

GÉNÉRALITÉS ET CLASSIFICATION DES CHAUDIÈRES

Conditions d'établissement des chaudières 155
Classification des chaudières 157

Digitized by Google

CHAPITRE XI

LES CHAUDIÈRES A FOYER EXTÉRIEUR

Chaudière cylindrique simple 161
Chaudières à corps cylindrique et tube carneau de retour 162
Chaudières cylindriques simples, à réchauffeurs 163
Fonctionnement des chaudières cylindriques simples 165
Corrosions des réchauffeurs 166
Chaudières à bouilleurs 167
Fonctionnement des chaudières à bouilleurs 168
Fausses indications des tubes de niveau raccordés aux bouilleurs 171
Chaudière à bouilleurs et réchauffeurs 175
Chaudière multi-bouilleurs 175
Chaudières semi-tubulaires à bouilleurs 179
Chaudières verticales 181

CHAPITRE XII

LES CHAUDIÈRES A FOYER INTÉRIEUR

Avantages du foyer intérieur 183
Chaudières de Cornouailles 184
Chaudières de Lancashire 184
Déformations des foyers intérieurs 185
Chaudière Galloway 189
Expériences de M. Fletcher sur les inégalités de température dans les chaudières à foyer intérieur 191
Effets des inégalités de température 197
Chaudière à galerie 199
Chaudière à foyer intérieur, semi-tubulaire 199
Chaudières semi-tubulaires, à foyer intérieur et retour de flamme . . . 200
Inconvénients des faisceaux tubulaires 203
Matelas de vapeur des jambettes de foyer 205
Chaudières tubulaires à foyer amovible 209
Chaudières verticales 212
Chaudière Field 214
Chaudière de locomotive 220

CHAPITRE XIII

LES CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES

Chaudières à tubes d'eau 225
Chaudières multitubulaires sans circulation 226
Générateur Belleville 226
Chaudière Root 230

Digitized by Google

Chaudière Serpollet 232
Chaudières multitubulaires, dites à circulation 233
Chaudière Babcock et Wilcox 236
Chaudière de Naeyer 237
Remarques sur les chaudières Babcock et Wilcox, et de Naeyer. 238
Chaudière Collet et modification Niclausse 243
Chaudière Dürr 246
Chaudière Barbe. 247
Chaudière Lagrafel et d'Allest. 248
Chaudières multitubulaires diverses 250

CHAPITRE XIV

FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES DITES A CIRCULATION

Théorie de Babcock sur la circulation dans les chaudières multitubulaires 257
Critique de la théorie de Babcock. 260
Expériences sur la circulation et la vaporisation dans les tubes 272
Expériences sur les chaudières multitubulaires 276
Rendement des chaudières multitubulaires 286

CHAPITRE XV

CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES DE TORPILLEURS

Chaudières multitubulaires de torpilleurs 291
Chaudière Thornycroft 293
Chaudière Yarrow 297
Fonctionnement des chaudières Express 298

CHAPITRE XVI

CHAUDIÈRES A ÉMULSION DE VAPEUR

Application à la chaudière n° 37 de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Sud-Est. 307
Application à une chaudière multitubulaire. 311
Application à une chaudière à bouilleurs de la Compagnie des Eaux-Vannes. 318
Application à une chaudière semi-tubulaire 320

CHAPITRE XVII

ACCIDENTS ET EXPLOSIONS

Causes originelles des accidents. 324
Accroissements de pression 325
Soupapes de sûreté. 327

Digitized by Google

Efforts dus aux inégalités de dilatation 328
Effets des dilatations et contractions alternées 332
Effets de la surchauffe des plaques tubulaires 333
Corrosions extérieures 336
Corrosions intérieures aux parties baignées 338
Corrosions intérieures aux espaces de vapeur 341
Théorie galvanique des corrosions intérieures 342
Manques d'eau et alimentation intempestive 344
Expériences de M. Fletcher sur les tôles de foyer portées au rouge . . . 345
Théorie des explosions par surchauffe de l'espace de vapeur 371
Théorie des explosions par mélanges détonants 373
Théorie des explosions par surchauffe de l'eau 375
Origine des explosions 377
Effets de réaction 378
Accidents spéciaux aux chaudières multitubulaires 380
Nécessité de la circulation de l'eau 383

CHAPITRE XVIII

THÉORIE SUR LES EFFETS DYNAMIQUES DES EXPLOSIONS

Contradictions dans les effets dynamiques 385
Statistiques officielles et déclarations omises 386
Expertises 386
Mémoire de M. Périssé 387
Faible influence du volume d'eau 389
Conclusions de M. Vinçotte 390
Rupture originelle 390
Formation de la vapeur 390
Rupture réduite en regard de la vapeur 392
Rupture étendue en regard de la vapeur 392
Rupture complète dans la vapeur 394
Rupture immergée réduite 394
Rupture immergée étendue 395
Position intermédiaire de la rupture 397
Résumé de la nouvelle théorie 398
Déductions de la théorie 398
Étude de M. Vinçotte sur les explosions de locomotives 399
Ruptures suivant les rivures longitudinales du corps cylindrique 399
Réactions sans explosion intérieure 403
Explosions par les dômes 403
Explosions par les foyers ou leur enveloppe 405
Rupture d'équilibre 407
Expérience de M. Lawson 408
Explosion de l'usine Cartier à Aubagne 409

Digitized by Google

CHAPITRE XIX

COMBUSTION ET CHAUFFAGE

Combustion des corps. 412
Combustibles ordinaires 414
Quantité d'air nécessaire pour la combustion 414
Volumes occupés par les produits de la combustion 416
Puissance calorifique des combustibles. — Calorimètres 417
Températûres accompagnant la combustion 419
Pyromètres 421
Point de dissociation des corps composés 422
Caractères des combustibles usuels. 423
Chauffage 428
Admission d'air au foyer 430
Grilles. 431
Analyse des produits de la combustion 432
Poids des produits de la combustion. 434
Causes de la combustion imparfaite 437
Parties saillantes sur les surfaces de chauff. 439
Températures d'inflammation 440
Allure des grilles. 440
Pertes par la cheminée 441
Tirage naturel 441
Tirage artificiel. 443

CHAPITRE XX

ÉPURATION ET FILTRAGE DES EAUX INDUSTRIELLES

Epuration 447
Filtration des eaux industrielles 448

Digitized by Google

ERRATA

—

Page 72, ligne 14, *au lieu de :* par 100 litres d'eau, *lire :* par 1.000 litres d'eau.
— 102, tableau, — Litres d'eau vaporisée par mètre carré et par heure, *lire :* Litres d'eau à 100° vaporisée à la pression atmosphérique par mètre carré et par heure.
Page 105, ligne 18, *au lieu de :* le feu était promptement porté au rouge, *lire :* le feu était très ardent et le registre était promptement porté au rouge.
Page 111, tableau, colonne 3, chiffre 4, *au lieu de :* $3^k,816$, *lire :* $2^k,816$.
— 163, ligne 4, *après :* et si les carneaux sont plus grands, *ajouter :* que la section nécessaire pour le tirage.
Page 192, ligne 12, *au lieu de :* 78°,34 *lire :* 98°,34.
— 229, — 10, — défectueux, *lire :* défectueuse.
— 321, tableau, colonne 5, surface de grille, *au lieu de :* $0^{m^2},48$, *lire :* $0^{m^2},96$.
— 325, ligne 3 du bas, *au lieu de :* la théorie mécanique et la chaleur, *lire :* la théorie mécanique de la chaleur.
Page 342, dernière ligne, *au lieu de :* retournera vers B, *lire :* retournera vers A.
— 389, ligne 20, *au lieu de :* $40^k,150$, *lire :* $40\,150^k$.
— 409, — 20, — au corps principal, *lire :* du corps principal.

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

DES

CHAUDIÈRES A VAPEUR

CHAPITRE PREMIER

ÉBULLITION A L'AIR LIBRE

Évaporation. — L'évaporation est le passage spontané d'un liquide à l'état gazeux ; la *vapeur* se produit exclusivement à la surface libre du liquide, mais nous verrons par la suite que la surface d'évaporation n'est pas seulement le *plan d'eau apparent.*

Les expériences de physique démontrent que dans le vide la vaporisation est immédiate, quelle que soit la température du liquide, et s'arrête seulement lorsque le volume de liquide transformé en vapeur est suffisant pour que celle-ci exerce sur les parois du vase qui la contient une certaine pression, toujours la même pour une même température, et que l'on désigne par sa *tension* ou sa *force élastique maximum* à la température de l'expérience.

Dans une atmosphère gazeuse limitée le phénomène se produit avec plus de lenteur, et s'arrête lorsque la vapeur a atteint sa force élastique maximum, qui est la même que dans le vide.

Dans une atmosphère gazeuse illimitée l'évaporation devient un phénomène continu. Dalton (*Annales de Gilbert*, vol. XV) a étudié la vitesse constante de cette évaporation qui dépend :

1° De la force élastique de la vapeur uniformément répandue dans l'atmosphère ;

Digitized by Google

2° De la force élastique de cette atmosphère ;

3° Des températures du liquide et de l'atmosphère ;

4° De l'étendue de la surface libre du liquide, par laquelle s'effectue l'évaporation ;

5° Du renouvellement des couches gazeuses en contact avec la surface libre du liquide.

L'évaporation est accompagnée d'une absorption de chaleur : un liquide qui s'évapore à l'air, et auquel on ne fournit pas de chaleur, se refroidit d'autant plus rapidement que l'évaporation est plus active. On nomme *chaleur latente de vaporisation* la quantité de chaleur ainsi absorbée par un volume de liquide pour passer à l'état de vapeur à la même température.

La *condensation des vapeurs* est leur retour à l'état liquide. Trois causes la provoquent : l'abaissement de la température qui correspond à leur force élastique maximum, la compression et l'affinité chimique.

Lorsque les vapeurs se condensent, elles dégagent en revenant à l'état liquide une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle absorbée pour passer de l'état liquide à l'état gazeux.

Ébullition. Vaporisation. — L'évaporation des liquides à l'air libre est fortement activée par l'élévation de leur température ; son intensité et la force élastique des vapeurs émises par la surface du liquide croissent ainsi avec la température jusqu'à une limite, à laquelle des bulles de vapeur plus ou moins grosses se forment dans le sein du liquide et viennent crever à la surface, la force élastique maximum des vapeurs à cette température égalant à ce moment la pression atmosphérique.

L'*ébullition* est cette production rapide et visible de vapeur dans la masse même du liquide et le dégagement globulaire de cette vapeur à la surface libre.

Lorsque l'ébullition se manifeste, le phénomène de l'évaporation par la surface libre se continue, et le volume total de la vapeur produite est la somme des volumes formés dans le sein du liquide et de celui émis par la surface libre. On appelle *vaporisation* d'un liquide son évaporation accompagnée d'ébullition.

Pour que l'ébullition se produise, il faut que la température

Digitized by Google

de la molécule d'eau qui passe à l'état gazeux, soit celle à laquelle la force élastique maximum de la vapeur fait équilibre :

1° A la pression atmosphérique qui s'exerce à la surface du liquide, augmentée du poids de la colonne d'eau, qui comprime cette molécule ;

2° A la pression capillaire et à l'attraction exercée par la matière du récipient, la formation des bulles de vapeur ayant toujours lieu au contact d'une surface solide.

Température d'ébullition de l'eau. — La température à laquelle l'eau entre en ébullition est toujours fixe pour les mêmes conditions d'expérience, mais à pression égale elle varie suivant la nature des récipients et les corps en dissolution dans l'eau. Sous une hauteur barométrique de 760 millimètres de mercure, dans un vase en cuivre, l'eau distillée bout à la température qui a été prise pour le point 100 de l'échelle thermométrique de Celsius. C'est la température de l'*ébullition normale*.

Les substances en dissolution dans l'eau et la matière dont sont formés les récipients influent sur la température de l'ébullition, et l'élèvent au-dessus de la normale.

Les températures d'ébullition, sous la pression de 760 millimètres et pour quelques solutions salines sont les suivantes :

Solution saturée de sulfate de soude	101°
— — acétate de plomb	102°
Eau de mer	104°
Solution saturée de carbonate de soude	105°
— — chlorure de sodium	108°
— — chlorhydrate d'ammoniaque	114°
— — azotate de potasse	116°
— — azotate d'ammoniaque	125°
— — carbonate de potasse	135°
— — potasse caustique	175°
— — chlorure de calcium	180°

Dans un ballon en verre, l'eau entre en ébullition à 102° environ : si le vase a été au préalable rincé à l'acide sulfurique, le point d'ébullition peut s'élever à 105° et même 106°. Toutefois un simple fragment de métal, placé au fond du ballon, suffit pour ramener la température de l'ébullition à 100°. Par le même

Digitized by Google

procédé on peut faire disparaître les soubresauts violents qui accompagnent l'ébullition des dissolutions salines ou acides dans les vases de verre.

Mais, quelle que soit la température de l'eau en ébullition, sous la pression de 760 millimètres, la température de la vapeur est toujours celle de l'ébullition normale.

Dulong a vérifié expérimentalement la température à laquelle se produit l'ébullition de l'eau sous différentes pressions : sous une pression de 4,5 millimètres de mercure elle bout à 0°, sous une pression de 92 millimètres à 50°, sous une pression de 760 millimètres à 100°, sous une pression de 1 520 millimètres à 120° environ.

Tyndall (*Heat as mode of motion*) a trouvé que la température de l'eau bouillante au sommet du Mont Blanc était en août 1859 de 85° environ. Pour l'atmosphère normale de 760 millimètres de mercure l'abaissement du point d'ébullition est de 1° environ pour chaque 324 mètres d'altitude, et de la température à laquelle l'eau bout on peut déduire approximativement la hauteur du lieu d'observation.

Formation des bulles de vapeur. — Si l'on chauffe de l'eau dans un récipient, on remarque que les bulles de vapeur se forment à certains points des parois, toujours les mêmes et qu'elles s'en détachent successivement, les conditions de chauffage restant les mêmes.

Avant que la température de l'ébullition n'ait été atteinte dans toute la masse du liquide, le volume des bulles de vapeur formées dans les couches inférieures va en diminuant à mesure qu'elles s'élèvent et se mettent en équilibre de température avec les couches qu'elles traversent, car elles transmettent au liquide par leur surface leur chaleur de vaporisation ; au contraire dès que la température de l'ébullition est atteinte dans toute la masse, le volume des bulles de vapeur augmente dans les couches supérieures du liquide.

Cette augmentation de volume est due à deux causes :

1° A la dilatation du volume de la bulle initiale, au fur et à mesure de la diminution de la charge d'eau qui la comprime ;

Digitized by Google

2° A l'évaporation additionnelle qui se continue sur toute sa surface.

Théorie de l'ébullition, forme particulière de l'évaporation. — Pour que l'ébullition à la température normale puisse se produire, la présence de l'air ou d'un autre gaz, à l'état libre dans la masse même du liquide, est indispensable.

La théorie de l'ébullition, forme particulière de l'évaporation par la surface des molécules gazeuses disséminées dans le liquide, a été présentée d'abord par de Luc (*Recherches sur les modifications de l'Atmosphère*), et vérifiée expérimentalement par Gernez.

Voici quelques expériences de M. Gernez, relatées dans les *Annales de Chimie et de Physique* (5e série, t. IV, 1875) :

a. — Dans un ballon en verre à moitié plein d'eau (fig. 1) il introduit une petite cloche en verre fixée à l'extrémité d'une tige et contenant une très petite bulle d'air : en chauffant le liquide on voit la bulle d'air augmenter de volume, et une succession de bulles de vapeur s'échapper du dessous de la cloche, sans qu'il s'en produise en aucune autre partie des parois du ballon.

Fig. 1.

b. — Dans un récipient contenant de l'eau en ébullition on plonge une petite cloche en verre, qui a été au préalable bien débarrassée de toute trace d'air adhérent aux parois par un lavage dans un acide ou alcali concentré (fig. 2) ; on saisit avec cette cloche une bulle de vapeur au passage : celle-ci se loge à la partie haute de la cloche et devient immédiatement un centre très actif d'évaporation. De nombreuses bulles de vapeur s'échappent de la cloche d'une façon régulière. Si au bout de quelques minutes on cesse de chauffer l'eau, l'ébullition s'arrête, la vapeur contenue dans la cloche se condense et l'on cons-

Digitized by Google

tate au sommet de celle-ci, la présence d'une très petite bulle d'air.

Pour que la formation des bulles de vapeur puisse se produire

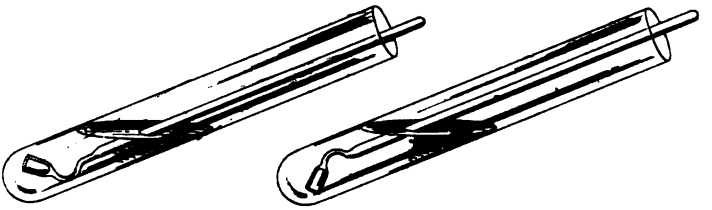


Fig. 2.

dans la masse même de l'eau il ne suffit pas que le corps gazeux soit en dissolution : il faut qu'il existe à l'état libre. Lorsqu'on chauffe de l'eau il y a dégagement d'air jusque vers 60 à 70° : on a supposé qu'à cette température tout l'air en dissolution était libéré. Il n'en est pas ainsi, car une partie de l'air est encore retenue par l'eau, puisqu'on la retrouve dans les bulles condensées. Cet air résiduel paraît donc ne se dégager à la température de l'ébullition que par affinité pour les parois du vase : c'est du moins ce qui résulte d'une autre expérience de M. Gernez, qui montre que l'on peut porter de l'eau contenant de l'air en dissolution, à une température dépassant celle de l'ébullition sans que celle-ci se manifeste : elle ne se produit que lorsque la température s'élève suffisamment pour que le gaz en se dégageant passe à l'état libre, ou qu'on détermine le dégagement du gaz par un moyen autre que l'élévation de la température au-dessus du point d'ébullition. A cet effet M. Gernez introduit une petite cloche et un bâton en verre (fig. 3) dans de l'eau contenant de l'air en dissolution et chauffée à une température dépassant 100°. La cloche, le bâton et le récipient contenant l'eau ont été au préalable

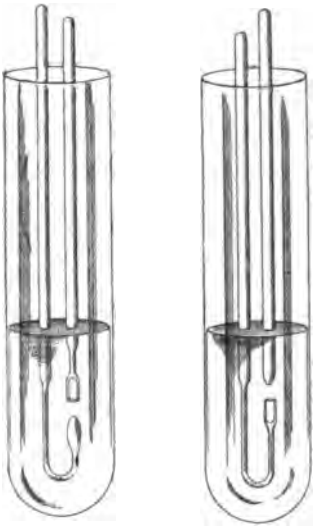


Fig. 3.

Digitized by Google

soigneusement débarrassés de toute trace d'air adhérent aux parois par un décapage. En frottant le bâton contre la cloche, on provoque par action mécanique le passage du gaz résiduel en dissolution à l'état libre, et l'ébullition se produit immédiatement.

De ce qui précède on conclut que si l'eau et les parois du récipient dans lequel on la fait bouillir ont été débarrassés de toute trace de corps gazeux, l'ébullition de l'eau à sa température normale ne saurait se produire faute de ces surfaces d'évaporation disséminées dans sa masse et indispensables à la formation des bulles de vapeur. C'est ce que démontrent en effet les expériences de Donny et de Dufour que nous reproduirons plus loin.

Les bulles de vapeur se forment toujours au contact des parois chauffées, et jamais dans la masse même du liquide : mais si au centre d'une masse d'eau en ébullition on plonge un corps solide, il y aura formation de bulles de vapeur sur toute la partie plongée du corps, qui agit comme surface chauffée quoiqu'elle ne soit pas en contact avec la source de chaleur. Pour qu'il y ait formation d'une bulle de vapeur au sein d'un liquide par élévation de température il faut donc la présence simultanée d'une molécule gazeuse maintenue au contact d'une molécule solide.

Forme et chemin des bulles de vapeur. — La forme initiale de la bulle de vapeur au contact de la surface sur laquelle elle est engendrée est celle d'une demi-sphère s'appuyant sur la paroi par le grand cercle.

En augmentant de volume elle prend une forme en poire, et comme le liquide en contact avec les parois chauffées est animé d'un mouvement très violent, la bulle de vapeur, penchée et saisie par le courant, s'allonge jusqu'au moment où elle se détache pour être entraînée ; sa vitesse de translation est alors égale à celle du courant d'eau qui l'entraîne.

Dans la partie de ce courant qui se meut horizontalement sur la paroi chauffée, la bulle de vapeur prend la forme d'un ellipsoïde et celle d'un sphéroïde aplati dès que la direction du courant devient ascensionnelle.

Digitized by Google

Mais, dès que la bulle quitte les courants d'eau locaux qui se produisent sur les surfaces chauffées, sa forme, sa vitesse, et le chemin parcouru se modifient considérablement, suivant qu'elle s'élève dans les couches du liquide le long d'une paroi solide ou au travers de la masse même.

La nouvelle forme est celle d'une calotte sphérique dont l'aplatissement est d'autant plus prononcé que le volume de la bulle est plus grand.

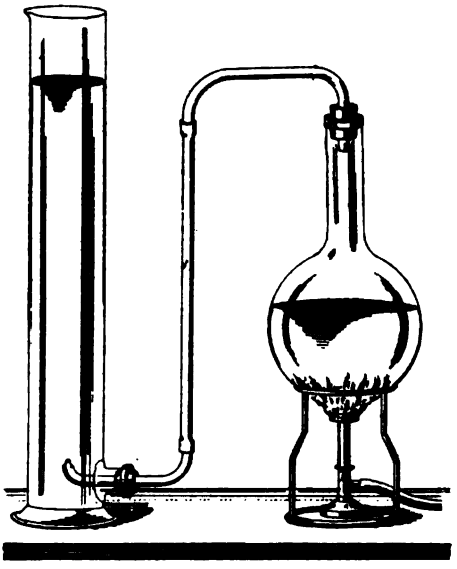


Fig. 4.

Si la bulle de vapeur s'élève le long d'une paroi, elle chemine par inclinaisons alternées, qui donnent à l'œil l'impression de contraction et de détentes successives. Si elle s'élève au travers d'une couche de liquide en traversant la masse même de l'eau, le chemin parcouru est une hélice dont le pas et le diamètre augmentent proportionnellement au volume de la bulle, mais la vitesse ascendante de celle-ci mesurée verticalement diminue avec son volume.

Ce qui précède peut être étudié facilement à l'aide du dispositif représenté à la figure 4.

En faisant déboucher au fond d'une éprouvette à pied, tubulée dans le bas, de 40 à 50 centimètres de hauteur et remplie d'eau bouillante, un petit tube en verre en communication avec un ballon chauffé et à moitié rempli d'eau, l'air contenu dans le ballon et ensuite la vapeur qui s'y dégage débouchent dans le fond de l'éprouvette pour s'élever à la surface.

Cause du mouvement des bulles de vapeur. — L'expérience qui précède peut encore démontrer que par application du principe d'Archimède, à volume égal, l'air et la vapeur ne parcourent

Digitized by Google

pas dans le même temps, un même chemin mesuré verticalement. La densité du corps gazeux a donc une influence sur la vitesse d'ascension.

Le mouvement d'une bulle de vapeur dans l'eau n'est qu'un phénomène de gravité, et pour que la bulle puisse se déplacer, il faut que les molécules d'eau qui se trouvent au-dessus d'elle, viennent se placer en dessous.

On a admis et posé comme principe que les bulles de vapeur possèdent en se dégageant une grande puissance physique, et qu'elles poussent violemment et mécaniquement vers la surface l'eau qu'elles rencontrent sur leur passage.

C'est une grave erreur, contraire aux lois élémentaires de la physique.

Si l'eau ne possède pas un mouvement initial propre, occasionné par une cause autre que la présence d'une bulle de vapeur dans sa masse, celle-ci ne saurait en aucun cas y produire d'autre mouvement que celui du passage à sa partie inférieure des molécules d'eau qui se trouvent à sa partie supérieure, mouvement limité à la zone voisine de la surface de la bulle, et de sens contraire à la direction de celle-ci.

Ce n'est qu'à la surface libre, alors que le poids de la colonne liquide au-dessus de la bulle est inférieur à la poussée du volume d'eau déplacé, que la couche superficielle est soulevée.

Ces soulèvements de la surface et les courants produits dans la masse pendant l'ébullition par une cause autre que la présence des bulles de vapeur, ont fait, par illusion d'optique, établir le principe de l'entraînement mécanique de l'eau par la vapeur qui se dégage dans son sein.

Mouvements d'une masse d'eau en ébullition. — Lorsqu'on fait bouillir de l'eau dans un récipient en le chauffant par le bas, la surface libre du liquide étant au moins égale à la surface de chauffe, on observe qu'un courant violent monte à la surface, entraînant dans sa course ascendante toute la production de vapeur de la surface chauffée : la direction de ce courant est toujours la même pour chaque expérience : il monte du fond le long d'une partie des parois du récipient, parcourt horizontale-

Digitized by Google

ment la surface du liquide, et retourne au fond le long de la paroi opposée. Les bulles de vapeur entraînées par le courant d'eau crèvent à leur passage à la surface, mais quelques-unes sont entraînées par le courant dans sa course descendante, luttent contre le mouvement qui leur est imprimé, et restent parfois immobiles un temps assez appréciable avant de prendre une forme leur permettant de s'élever à travers la masse d'eau plongeante.

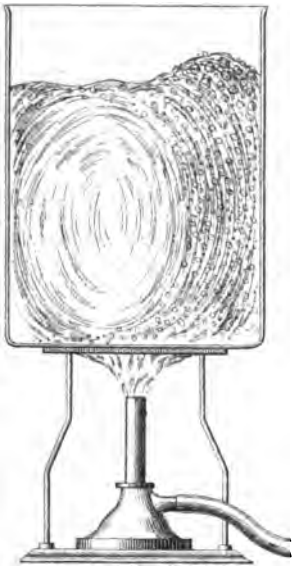


Fig. 5.

En disposant un vase en verre cylindrique, à fond plat ou bombé, comme il est représenté à la figure 5, on pourra observer très facilement la formation des bulles de vapeur et les courants qui se produisent dans la masse d'eau avant et pendant l'ébullition. Ces mouvements peuvent être facilement rendus plus apparents en jetant dans le liquide des petits carrés de papier, qui sont entraînés par les courants.

La vitesse du courant provoqué par l'ébullition augmente avec l'intensité du phénomène : mais quelle que soit cette vitesse et la production de la surface chauffée, les bulles de vapeur entraînées restent séparées et ne s'agglomèrent jamais.

Fig. 6.

Si quelques-uns des petits index en papier viennent par hasard se déposer au contact de la surface chauffée, on constatera qu'il n'y a le long de cette surface aucun autre mouvement de la couche liquide que celui qui est dû au déplacement de l'eau provoqué par la formation des bulles de vapeur ; et cela malgré la violence du courant qui passe à une distance de moins de un millimètre. Idéalement le phénomène peut être conçu comme si une sphère de liquide, suspendue sur un axe horizontal, était tangente à un plan d'eau immobile, et pivoterait sur son axe sous l'impulsion reçue par la vapeur qui se dégagerait du plan dans la direction du mouvement (fig. 6).

Digitized by Google

Cause des mouvements d'une masse d'eau en ébullition. — Le mouvement de l'eau est exclusivement produit par la différence de densité des molécules liquides : celles-ci, en passant dans le voisinage de la surface de chauffe, absorbent une partie de la chaleur latente de vaporisation, deviennent plus légères, montent à la surface, une partie se vaporise en empruntant aux molécules voisines leur chaleur latente, celles-ci du fait de cet abandon deviennent plus lourdes que celles des couches du bas, et tombent au fond en poussant à la surface celles des couches inférieures.

L'absorption de la chaleur latente de vaporisation par les molécules liquides qui passent à l'état gazeux ne peut s'effectuer que par additions successives : elle est nécessitée par le travail à développer pour faire occuper à la molécule liquide un volume 1700 fois plus grand, et pour atteindre ce volume elle doit forcément passer par les états intermédiaires.

Nous verrons qu'à une certaine limite de température et de pression les liquides passent instantanément dans toute leur masse à l'état gazeux, et que cette limite doit correspondre au point critique où, la densité du gaz étant égale à celle du liquide, il n'y a plus d'absorption de chaleur latente pour le changement d'état du corps.

Avant l'ébullition la surface libre de l'eau chauffée émet une quantité considérable de vapeur, alors que les bulles qui se détachent des parois chauffées sont microscopiques et doivent contenir une forte proportion d'air. Cette grande activité de vaporisation de la surface libre ne s'explique que par ce qui précède, et par l'impossibilité de l'évaporation au sein du liquide sans la présence d'une molécule gazeuse retenue par un corps à l'état solide, dans les conditions indiquées page 3.

Quant à l'immobilité de la couche fluide immédiatement en contact avec la paroi chauffée, celle-ci n'est évidemment qu'un phénomène d'attraction moléculaire.

Influence de l'étendue de la surface libre. — Si la surface libre de l'eau en ébullition est plus petite que la surface chauffée, les courants occasionnés par l'élévation de température des molécules

Digitized by Google

liquides se produisent toujours, mais ils sont moins violents, les bulles de vapeur entraînées par le courant s'agglomèrent avant de crever à la surface et la quantité de vapeur dégagée diminue.

Plus grand est l'étranglement, plus grande est l'agglomération des bulles et moindre la quantité de vapeur dégagée. Si la surface libre du liquide se trouve au-dessus de l'étranglement, toute la colonne d'eau qui le surplombe ne participe pas au mouvement giratoire et le dégagement de la vapeur est considérablement gêné.

Fig. 7.

On réalise facilement l'expérience en plaçant (fig. 7) un flacon à large goulot dont on a fait sauter le fond, sur le col d'un ballon ; une bague en caoutchouc fait le joint des deux pièces, qu'il est nécessaire de haubaner sur la table d'expérience, les chocs violents produits par le dégagement des grosses bulles de vapeur qui s'amassent au col renversant l'appareil si cette précaution était négligée.

En se plaçant dans les mêmes conditions de volume d'eau, de surface de chauffe et d'intensité du foyer que dans le cas de la figure 5, et en pesant les volumes d'eau au début et à la fin de chaque expérience, il est facile de constater que l'obstacle formé par l'étranglement, au dégagement des bulles et à la vaporisation par la surface libre, diminue dans une très forte proportion le volume d'eau vaporisé dans un temps donné.

Dans le cas de la figure 7, la production de vapeur est limitée à celle qui se dégage sous forme de bulles au contact de la paroi chauffée et à la surface de ces mêmes bulles pendant qu'elles s'élèvent dans la masse du liquide. Le dégagement par la surface libre que nous avons analysé plus haut est supprimé : les molécules d'eau du courant plongeant conservent une partie de la chaleur latente de vaporisation absorbée lors du passage sur la surface de chauffe et leur poids spécifique n'augmente plus aussi

Digitized by Google

rapidement. Cette cause diminue la vitesse des courants de montée et de descente, diminue la rapidité de la transmission des vibrations calorifiques aux molécules liquides et par là diminue la vaporisation et l'efficacité de la surface de chauffe.

Chaleur latente de vaporisation. — Regnault (*Mémoires de l'Académie*, vol. XXI) a donné une formule empirique, résultat de nombreuses expériences, pour calculer la chaleur totale qui doit être absorbée par l'eau pour être vaporisée à une température donnée.

L'unité de chaleur adoptée étant la *calorie*, c'est-à-dire la quantité de chaleur absorbée par un kilogramme d'eau pour que la température de sa masse soit élevée de 1 degré centigrade, la formule de Regnault donne pour la chaleur totale absorbée par 1 kilogramme d'eau à 0° vaporisé à la température t la relation :

$$\text{Chaleur totale} = 606{,}5 + 0{,}305\ t, \text{ en calories.}$$

A la température de l'ébullition normale à l'air libre cette relation donne pour la chaleur latente de vaporisation d'un kilogramme d'eau :

$$(606{,}5 + 0{,}305 \times 100) - 100 = 537 \text{ calories}$$

c'est-à-dire que par le fait de la vaporisation, il y a disparition d'une quantité de chaleur de 5,37 fois celle qu'il faut faire absorber par l'eau pour l'amener de 0° à sa température d'ébullition. La formule simplifiée qui précède suppose que la quantité de chaleur absorbée par 1 kilogramme d'eau à une température quelconque pour s'échauffer de 1 degré soit constante. Regnault donne pour la chaleur absorbée par 1 kilogramme d'eau pour passer de 0° à t° la relation suivante :

$$q = t + 0{,}00002\ t^2 + 0{,}0000003\ t^3$$

M. Zeuner, dans sa *Théorie Mécanique de la Chaleur*, a établi que, la calorie correspondant à la quantité de chaleur absorbée par 1 kilogramme d'eau à son maximum de densité + 4° pour s'élever à + 5°, le nombre de calories contenues dans 1 kilogramme d'eau à 100° était de 100,5 calories ; à 150° de 151,4 calories ; à 180° de 182,4 calories.

Digitized by Google

L'absorption de la chaleur latente de vaporisation et la facilité de transmission des vibrations calorifiques des molécules liquides à celles d'entre elles qui passent à l'état gazeux, sont facilement démontrés par l'expérience de Leslie, et par le cryophore de Wollaston.

Rôle des phénomènes capillaires dans l'ébullition. — Les lois de la capillarité jouent dans le phénomène de l'ébullition un rôle important.

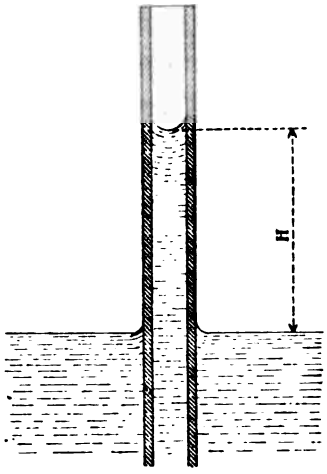


Fig. 8.

Si nous plaçons dans la cloche de la machine pneumatique une cuvette contenant de l'eau et un tube capillaire (fig. 8), nous voyons en faisant le vide que l'eau reste dans le tube capillaire. Il faut donc que la vapeur d'eau, dont la force élastique, au contact du ménisque concave dans le tube capillaire, est inférieure du poids d'une colonne de vapeur de hauteur H à celle qu'elle possède au contact de la surface plane de l'eau dans la cuvette, soit en équilibre avec son liquide là où la surface est concave à pression plus basse que là où elle est plane. Sir W. Thomson (*Philosophical Magazine*, vol. XLII) démontre que cette conception est seule en harmonie avec les principes fondamentaux de la Thermodynamique. Il a obtenu la formule suivante pour le calcul de cette différence :

$$f = F - \frac{2S}{R} - \frac{d'}{(d - d')} \qquad (1)$$

dans laquelle f est la force élastique de la vapeur au contact d'une paroi concave, F celle au contact d'une paroi plane, S la constante capillaire, R le rayon de courbure de la surface concave, d la densité de l'eau, d' celle de la vapeur. A l'aide de cette formule, il a calculé que pour un tube capillaire de 1 millième de millimètre de diamètre, dans lequel l'eau s'élèverait à 30 mètres de hauteur, la tension de la vapeur d'eau au contact de la paroi

Digitized by Google

concave serait les 999 millièmes de la tension au contact de la paroi plane. Si petite que soit cette différence, elle suffit à expliquer l'impossibilité, sans la présence d'une bulle d'air, du passage des molécules d'eau à l'état gazeux au sein du liquide à la température de l'ébullition normale. En effet, si nous considérons une bulle de vapeur d'un très petit rayon R en équilibre dans la masse du liquide, il faut, pour que cet équilibre se réalise, que la tension f de la vapeur d'eau, plus la pression p de l'air, qui forment la bulle, fassent équilibre à la tension superficielle t du liquide qui enveloppe la bulle (voir p. 3) plus la pression extérieure P qui s'exerce sur le plan horizontal qui passe par le centre de la bulle. La condition d'équilibre nous sera donnée par l'équation :

$$f + p = t + P \qquad (2)$$

L'étude des lois sur les phénomènes capillaires nous donne pour t (formule de Laplace) la valeur $\frac{2S}{R}$ et, en substituant cette valeur et celle de f donnée par l'équation (1) dans l'équation (2), nous obtenons :

$$F = P - p + \frac{2S}{R}\left(\frac{d}{d - d'}\right) \qquad (3)$$

Si nous supposons que la présence de l'air dans la bulle ne soit pas réelle, p devient zéro, et la force élastique de la vapeur doit être supérieure à la pression extérieure d'une quantité d'autant plus grande que le rayon R de la bulle est plus petit. A la température à laquelle correspond la force élastique F, il y a donc une limite au rayon primitif de la bulle de vapeur au-dessous de laquelle la vaporisation ne peut plus se produire à cette température dans le sein du liquide. Ce rayon primitif ne peut être donné que par la bulle d'air originelle.

Tension superficielle. — Dans les formules qui précèdent, le terme $\frac{2S}{R}$ représente la pression qui s'exerce sur la masse gazeuse intérieure d'une bulle, du fait de la surface liquide qui la limite. On peut constater l'existence de cette pression par l'expérience suivante : on souffle une bulle de savon à l'extrémité d'un

Digitized by Google

tube, on bouche l'extrémité opposée avec le doigt, et on la découvre devant la flamme d'une bougie. La bulle en se contractant chasse l'air par le tube et éteint la flamme. Dans ce cas, les pressions exercées par les surfaces intérieure et extérieure de la bulle s'ajoutent, et la valeur de l'excès de pression dû aux surfaces liquides est $\frac{4S}{R}$.

La surface libre du liquide est donc le siège d'une tension tangentielle, égale dans toutes les directions et comparable en tous points à une mince membrane en caoutchouc enveloppant le liquide.

La force de cohésion qui s'exerce entre les molécules de la surface des liquides s'appelle *tension superficielle*, et sa valeur est mesurée en milligrammes par millimètre de longueur. On nomme sa valeur S pour un même liquide *constante capillaire*.

L'existence de la tension superficielle des liquides est facilement vérifiée en saupoudrant la surface de l'eau de lycopode, et en plongeant verticalement dans le liquide un agitateur graissé, pour qu'il ne puisse s'établir de contact entre l'eau et le verre. On voit la poudre entraînée de toute la surface vers le trou ainsi formé dans l'eau, et disparaître dans ce trou, comme si elle avait été posée sur une membrane que l'agitateur entraînerait en s'enfonçant. Dès qu'on relève celui-ci, la poudre reparaît en même temps et reprend la position primitive.

Les belles expériences d'Athanase Dupré et de Van der Mensbrugghe montrent expérimentalement quelques effets de la tension superficielle des liquides.

Causes de la tension superficielle. — Le phénomène de la tension superficielle des liquides et les lois qui le régissent ont été étudiés par tous les grands physiciens : elle est un effet de l'attraction moléculaire. Les molécules de la surface du liquide se trouvant en contact de molécules gazeuses exerçant sur elles une attraction moindre, ne sont pas en état d'équilibre au point de vue de ces forces attractives, et le phénomène de la cohésion des molécules entre elles peut se manifester.

Laplace a appelé sphère d'activité moléculaire la sphère com-

Digitized by Google

prenant toutes les molécules sur lesquelles une molécule centrale peut exercer son action attractive.

Si nous considérons une molécule quelconque *m* (fig. 9) dans le sein du liquide, elle n'est soumise qu'aux attractions des molécules comprises dans sa sphère d'activité et sur lesquelles elle exerce des actions égales et directement opposées. Les composantes de la force attractive s'équilibrent l'une par l'autre et leurs résultantes sont nulles. Mais pour une molécule *m'* de la surface, la valeur des composantes au-dessus de la surface géométrique S passant par le centre des molécules diminue et devient égale à celle de la cohésion des molécules gazeuses : la différence s'ajoute aux composantes comprises dans la surface géométrique et en dessous de celle-ci, et donne une résultante tangente à la surface. Ce sont ces résultantes tangentielles de la cohésion qui produisent les effets mécaniques que nous venons d'examiner et ceux que nous examinerons au chapitre suivant.

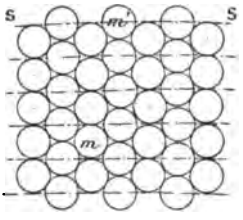


Fig. 9.

Expérience de de Romilly. — De Romilly (*Journal de physique*, 1re série, vol. VI) a démontré la valeur considérable que la tension superficielle des liquides peut acquérir par l'expérience suivante (fig. 10) :

On prend une cloche de verre *a* de 20 centimètres de diamètre, que l'on ferme à sa base par un tulle dont les mailles sont espacées de 2 à 3 millimètres ; on fixe cette cloche de manière que sa base soit bien horizontale ; on la plonge ensuite dans une cuve pleine d'eau que l'on aspire en partie à l'intérieur de la cloche, au moyen d'un tube en caoutchouc *e* à robinet. On ferme le robinet, on retire la cuve et l'eau demeure suspendue. A chaque maille correspond à l'extérieur un ménisque convexe assez prononcé.

On peut échauffer l'eau jusqu'à l'ébullition : malgré la diminution de la valeur de la tension superficielle produite par la chaleur, l'eau se maintient suspendue et bout tranquillement. Pour le succès de cette dernière expérience, il est bon de faire commu-

Digitized by Google

niquer la cloche à ébullition *a* avec une très grande cloche *d* dans laquelle la vapeur vient se condenser, évitant ainsi que la pression ne puisse, en s'élevant brusquement, dépasser le poids

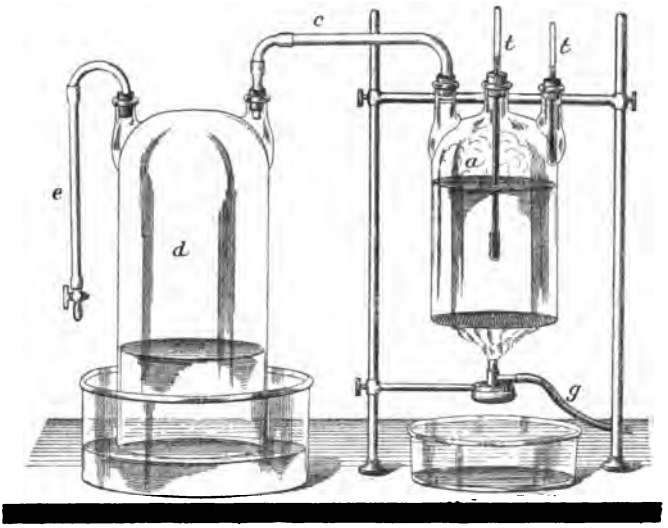


Fig. 10.

que peuvent supporter les ménisques de raccordement avec les fils. Le liquide s'écoulerait alors peu à peu à travers les mailles.

Caléfaction. — Etat sphéroïdal. — Si l'on projette de l'eau sur une surface métallique portée au rouge, les phénomènes qui se présentent paraissent en contradiction avec les lois de l'évaporation et de l'ébullition. En effet l'eau projetée se divise en gouttelettes, affectant la forme sphérique, qui courent sur la surface métallique animées d'un mouvement giratoire violent. Elles n'entrent pas en ébullition, mais il y a une évaporation lente, car leur volume diminue petit à petit et elles finissent par disparaître complètement.

Si l'on verse l'eau au moyen d'une pipette et avec précaution, les gouttes d'eau s'agglomèrent et la forme est alors celle d'un sphéroïde aplati dont l'étendue augmente avec le volume.

Si l'on supprime la source de chaleur, la température du métal baisse graduellement, et il arrive un moment où elle n'est pas

Digitized by Google

assez élevée pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal : l'eau mouille alors tout à coup le métal, et une ébullition violente se manifeste qui amène une vaporisation très rapide du volume d'eau.

M. Boutigny (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. IX, XI, XXVII, XXVIII) a principalement étudié les phénomènes relatifs à l'état sphéroïdal des liquides : il plongea un très petit thermomètre au sein d'un sphéroïde d'eau en caléfaction et quoique la température indiquée par ce thermomètre dut être influencée par le rayonnement des parois de la capsule métallique dont il se servait pour ses expériences, elle est toujours restée inférieure à celle de l'ébullition normale, environ 95°. Depuis, M. Berger (*Annales de Poggendorff*, t. CXIX) a contrôlé ces résultats, ayant pu obtenir des sphéroïdes d'eau en caléfaction d'un volume assez considérable, environ 500 centimètres cubes, et a trouvé que la température de la partie supérieure est d'environ 90°, celle des couches inférieures d'environ 97° ; ici l'influence du rayonnement des parois métalliques est plus marquée.

Mais si le liquide à l'état sphéroïdal reste toujours à une température plus basse que celle de son point d'ébullition, la température de la vapeur est au contraire toujours égale à celle de la surface métallique.

Expériences de Boutigny, Faraday et Poggendorff. — M. Boutigny a été le créateur de l'expérience qui consiste à introduire une petite quantité d'eau dans un sphéroïde d'acide sulfureux anhydre en caléfaction dans une capsule de platine : l'eau se congèle immédiatement et l'on retire un petit bloc de glace d'une capsule chauffée au rouge. L'on peut de même congeler le mercure dans un mélange d'éther et d'acide carbonique solide : cette expérience est due à Faraday.

A l'état de caléfaction il n'y a pas contact entre le liquide et la surface métallique fortement chauffée.

Poggendorff en a réalisé la démonstration en reliant une capsule métallique à un des pôles d'une pile voltaïque en passant par un galvanomètre, l'autre pôle étant relié à un fil métallique

Digitized by Google

que l'on fait plonger dans un sphéroïde d'eau en caléfaction. Tant que l'état sphéroïdal se manifeste, le galvanomètre n'accuse aucune déviation : mais dès que la source de chaleur étant retirée, la température de la capsule baisse suffisamment pour que le liquide vienne au contact du métal, le courant passe et le galvanomètre l'accuse (fig. 11).

Ces expériences peuvent être répétées avec de nombreuses variantes. L'eau ne passe pas à travers une toile métallique portée

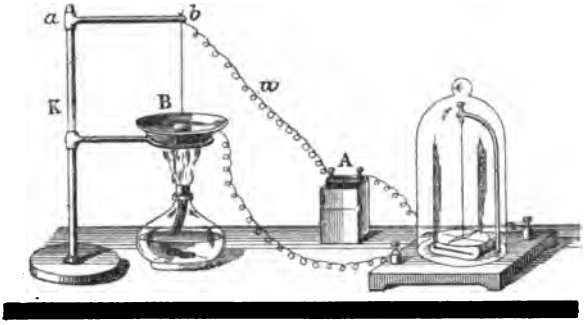


Fig. 11.

au rouge : elle rebondit, comme un ballon en caoutchouc sur le sol, sur une surface convexe chauffée au rouge. On peut aussi renverser les expériences, et par exemple plonger dans un vase en verre contenant de l'eau à une température voisine de celle de l'ébullition une sphère en cuivre portée au rouge ; le liquide n'entre pas en ébullition, mais dès que la température de la bulle a suffisamment baissé pour permettre à l'eau de venir au contact du métal, l'ébullition se produit avec une telle intensité que le liquide est projeté de tous côtés hors du vase, qui souvent est brisé par la violence de la vaporisation.

Pour que les phénomènes relatifs à l'état sphéroïdal de l'eau se manifestent, il n'est pas nécessaire que le métal soit porté au rouge : il suffit que la température du métal dépasse 170°.

Expérience de M. Hirsch. — Si par un artifice quelconque, on amène la température des parois d'un vase métallique contenant de l'eau en ébullition à 170°, le contact entre l'eau et le récipient est supprimé. Voici comment M. Hirsch (*Expériences sur le*

Digitized by Google

coup de feu des Chaudières à vapeur) a réalisé cette expérience :

« Une casserole étamée et bien propre fut graissée à l'oléonaphte, puis chauffée sans eau sur un feu doux, de manière à décomposer la matière grasse ; le fond se trouva ainsi couvert d'un enduit noirâtre, auquel l'eau n'adhérait pas. La casserole, ainsi préparée, fut disposée sur le fond à la place de la chaudière d'expérience, et l'on donna le feu. Au bout d'un instant d'ébullition, on vit le fond devenir rouge ; la tache incandescente, limitée d'abord en un point, ne tarda pas à s'étendre et à occuper toute la partie du fond correspondant à l'embouchure du fourneau.

« Si la partie grasse de la paroi n'a qu'une étendue limitée, l'incandescence se manifeste tout d'abord dans cette partie ; mais elle gagne peu à peu et s'étend tout autour, de proche en proche, à toute la partie exposée à la flamme.

« Il est évident que, dans ces expériences, le fond n'était plus mouillé, que l'eau était à cet état que M. Boutigny a désigné sous le nom de *sphéroïdal*. C'est un spectacle fort intéressant que de voir, à travers l'eau en ébullition, le fond d'une chaudière porté à la température rouge. Inutile d'ajouter que l'étain était fondu, et que le fond de la casserole en dedans comme en dehors, présentait toutes les apparences d'un magnifique coup de feu.

« Cette expérience a été renouvelée plusieurs fois avec des intensités de feu variables : avec un feu correspondant à une vaporisation d'environ 270 kilogrammes par mètre carré et par heure, la couleur du fond était l'orangé vif ; mais l'effet s'est produit même avec un feu beaucoup plus modéré, correspondant à environ 150 kilogrammes, auquel cas le fond était couleur cerise sombre. »

Expérience de Boutigny. — Parmi les nombreuses expériences de Boutigny nous devons encore en citer une, qui a été présentée par lui comme une explication des explosions de chaudières à vapeur et que nous aurons à discuter en traitant des accidents de chaudières.

Si l'on prend un vase en cuivre assez épais (fig. 12) que l'on chauffe fortement sans toutefois atteindre la température du rouge,

Digitized by Google

en y introduisant un peu d'eau celle-ci passe à l'état sphéroïdal. En fermant le col du vase par un bouchon traversé par un petit tube en verre, on voit s'en échapper la vapeur produite à l'intérieur tant que l'on continue à chauffer le récipient : mais si l'on cesse de chauffer, dès que la température du vase tombe au-dessous de 170°, l'état sphéroïdal disparaît, l'eau vient au contact des parois, il se forme instantanément un grand volume de vapeur, et le bouchon est violemment projeté à une grande hauteur comme par l'explosion de la poudre à canon.

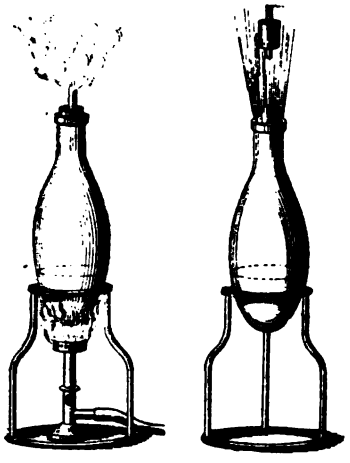


Fig. 12.

Rôle des phénomènes capillaires dans la caléfaction. — Pour expliquer le phénomène de l'état sphéroïdal de l'eau (et de tous les liquides) il suffit de considérer que le liquide n'est pas en contact avec la paroi chauffée, et qu'il en est séparé par une couche de vapeur qui se dégage directement de sa surface inférieure, passe de suite à une température très élevée, et qui fait non seulement équilibre au poids du liquide, mais lui imprime par le fait de sa dilatation les mouvements propres à l'état sphéroïdal. Cette couche de vapeur étant, comme tous les corps à l'état gazeux, très mauvaise conductrice des vibrations calorifiques, la quantité de chaleur qui la traverse ne peut produire que l'évaporation limitée qui résulte des expériences.

La caléfaction ne serait donc qu'un cas particulier des phénomènes de capillarité.

Wolf (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLIX) a montré que dans les tubes capillaires, si la température du tube et de l'eau augmente, l'ascension du liquide dans les tubes capillaires et la concavité du ménisque diminuent. Il s'ensuit que si la température du tube capillaire était supérieure à celle de l'eau, l'ascension se changerait en dépression et le ménisque de concave deviendrait convexe, abaissement de la colonne et

Digitized by Google

convexité du ménisque augmentant avec l'écart des températures. Dans ces conditions la tension superficielle d'une goutte d'eau à l'état sphéroïdal devrait faire équilibre à l'influence de la pesanteur. C'est en réalité ce qui se passe. M. Gossart (*Thèse du Doctorat*, Paris, 1889) a déterminé théoriquement le profil du sphéroïde de caléfaction, en appliquant les formules relatives aux formes des surfaces des liquides en contact de parois solides, et a vérifié que ce profil théorique se superposait à la photographie agrandie des gouttes caléfiées.

Phénomène de la surchauffe. — Lorsque l'eau a été débarrassée de l'air qu'elle contient en dissolution, la force de cohésion des molécules d'eau entre elles est considérable ; une expérience de Tyndall le démontre d'une façon frappante. Dans un marteau d'eau en forme de V (fig. 13) il amenait l'eau dans une

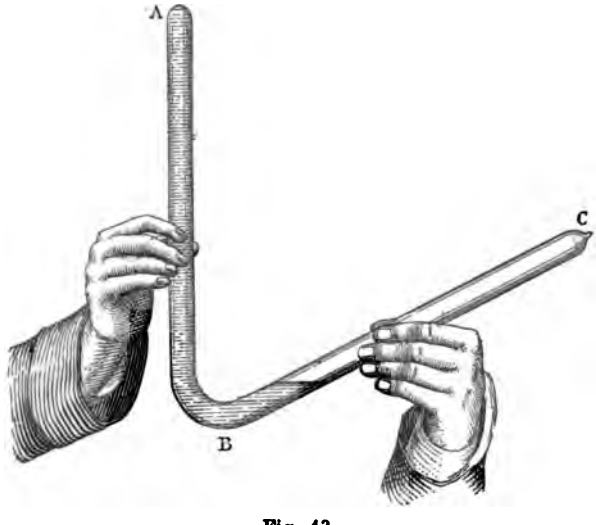


Fig. 13.

des branches, et la plaçant verticalement, l'eau reste dans cette branche : « Ses molécules adhèrent avec tant de ténacité aux parois du tube, et se tiennent ensemble si serrées, qu'elle refuse de se comporter comme un liquide, qu'elle cesse d'obéir aux lois de la gravité[1]. » Si nous reprenons la formule (3)

Heat as a mode of motion.

Digitized by Google

de la page 5, et l'appliquons à ce cas spécial, elle devient :

$$F = P + \frac{2S}{R}\left(\frac{d}{d - d'}\right)$$

Sous la pression de 760 millimètres de mercure, F correspondant à la force élastique de la vapeur à 100°, l'ébullition de l'eau ne peut pas se produire. Mais à mesure que, par suite de l'élévation de la température, F augmente, R diminue. La formation d'une bulle de vapeur peut se produire lorsque F atteint une valeur qui satisfait à l'équation en prenant pour R le rayon de la sphère d'activité moléculaire. Mais dès qu'une bulle s'est produite dans ces conditions, la valeur de R s'augmente du rayon de cette bulle, F devient plus grand que le deuxième terme de l'équation, l'équilibre se rompt immédiatement et l'ébullition se manifeste en projetant violemment toute la masse du liquide.

Expérience de Donny. — M. Donny de Gand (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, vol. XVI) a étudié le premier en 1844 ce phénomène expérimentalement.

Il se servait d'un vase de forme spéciale, consistant en un tube

Fig. 14.

de verre CAB (fig. 14) recourbé à un bout, et terminé à l'autre par une grosse boule de même matière, suivie d'une autre plus petite, qui se termine en pointe effilée. Avant de fermer celle-ci, on introduit de l'eau dans le tube, puis on la fait bouillir un certain temps pour chasser tout l'air. Soudant alors la pointe effilée à la lampe, on a de l'eau dans la branche recourbée, et de la vapeur à une très faible tension dans le tube AB et dans les boules. Or si l'on plonge maintenant la partie AC remplie d'eau dans un bain concentré de chlorure de calcium, et si l'on chauffe graduellement, la température peut monter à 130° sans qu'il se manifeste aucune ébullition dans le tube. Ce n'est qu'à 138° que l'ébullition a lieu ; mais alors elle se produit tout d'un coup, et l'eau est projetée dans les boules, qui peuvent être brisées.

Digitized by Google

Expérience de Galy-Gazalat. — Le même phénomène fut obtenu par M. Galy-Gazalat. Il recouvrit d'une couche d'huile de l'eau purgée d'air par l'ébullition, et la porta à 123° sans que le liquide commençât à bouillir; mais bientôt il se fit une violente explosion de vapeur, laquelle projeta une partie de l'eau hors du vase qui la contenait.

Expériences de Dufour. — 1° M. Dufour de Lausanne (*Archives des Sciences Physiques et Naturelles*, vol. XII) a étudié le retard que subit l'ébullition des liquides lorsqu'on les préserve du contact de l'air, en les mettant en suspension dans des liquides de même densité, mais moins volatils. Il a ainsi trouvé que l'eau, en suspension dans un mélange convenable d'essence de girofle et d'huile de lin qu'on chauffait au bain-marie, ne se transforme brusquement en vapeur qu'à une température voisine de 120°.

2° M. Dufour a observé qu'il suffit de toucher, avec un corps solide quelconque, les liquides ainsi portés à une température supérieure à celle de leur ébullition, pour qu'ils se vaporisent instantanément d'une manière violente. Toutefois les corps employés comme excitateurs perdent peu à peu leur propriété active. M. Dufour explique cette action par l'influence de la couche d'air adhérente à leur surface; et en effet, si, au moyen d'une immersion prolongée, on les débarrasse de l'air ainsi retenu, ils sont complètement inactifs.

3° En outre il a constaté que plus la quantité de gaz dissoute dans un liquide est faible, plus la température d'ébullition est élevée.

4° Enfin si au sein de l'eau surchauffée on fait passer entre deux fils de platine un courant voltaïque qui libère dans l'eau les deux gaz qui la composent, l'ébullition violente du liquide se produit tout à coup dès qu'on lance le courant.

Phénomènes des Geysers. — L'ébullition violente de l'eau est aussi provoquée en présence de l'air par la rupture de l'équilibre entre la force élastique de la vapeur à une température donnée et la pression correspondante à la vaporisation à cette même température. Si dans l'équation (3) page 15, P diminue, R diminue

Digitized by Google

et la limite à laquelle les bulles de vapeur peuvent se produire s'abaisse également. La nature nous offre la vérification expérimentale de la théorie, dans une de ses merveilles : le grand Geyser d'Islande, volcan à éruptions intermittentes d'eau et de vapeur : c'est un tube naturel enfoui dans le sol, de 23 mètres de profondeur et de 3 mètres de diamètre surmonté d'un bassin de forme elliptique dont le grand et le petit diamètre mesurent respectivement 18 et 16 mètres. L'étude de ce volcan a été faite par le professeur Bunsen et voici comment Tyndall (*Heat as a mode of motion*, 1892) relate le phénomène, et l'expérience à l'appui qu'il présentait à son cours :

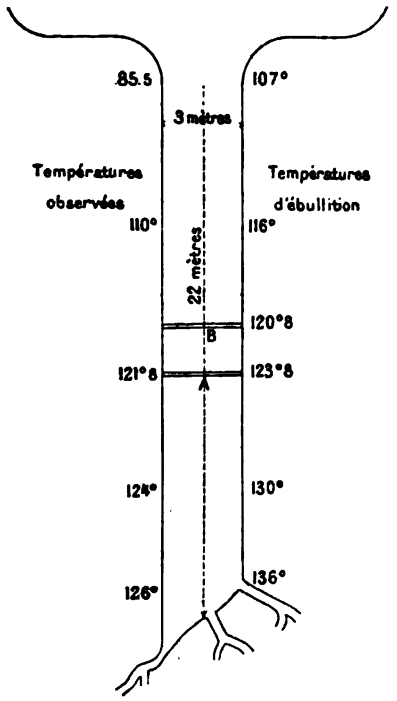


Fig. 15.

« Avant une éruption, le tube et le bassin se sont remplis d'eau chaude ; les détonations qui ébranlent le sol se font entendre par intervalle, et chacune d'elles est suivie d'une violente agitation dans le bassin. L'eau est soulevée dans le tuyau de manière à former un monticule au centre du bassin ; il en résulte un trop-plein qui se déverse. Ces détonations sont dues évidemment à la production de vapeur dans les conduits qui alimentent le tube du Geyser ; cette vapeur, se mêlant à l'eau plus froide du tube, y est soudainement condensée, et produit les explosions. M. le professeur Bunsen a réussi à déterminer la température du tube du Geyser depuis le sommet jusqu'au fond, quelques minutes avant une grande éruption, et ses observations ont révélé le fait extraordinaire que sur aucune partie du tube l'eau n'atteignait le point d'ébullition. Dans le dessin ci-joint (fig. 15) j'ai indiqué, à gauche les températures réellement observées, et à droite les températures d'ébul-

Digitized by Google

lition calculées, en tenant compte tout à la fois de la pression de l'atmosphère et de la pression de la colonne d'eau superposée. La portion du tube où l'eau est la plus voisine de son point d'ébullition est en A, à 9 mètres du fond ; et là même l'eau est à 2 degrés centigrades au-dessous de la température à laquelle elle peut bouillir. Comment donc une éruption peut-elle arriver dans de telles circonstances ?

« Fixez votre attention sur l'eau à ce point A, où la température est à 2 degrés au-dessous du point d'ébullition. Rappelez à votre esprit le soulèvement de la colonne au moment où la détonation a été entendue. Admettons que l'arrivée de la vapeur par les conduits du fond du tube ait soulevé la colonne du Geyser de 2 mètres, hauteur tout à fait comprise entre les limites de l'observation réelle, ce soulèvement amène l'eau de A en B. Son point d'ébullition en A était 123°,8, et sa température actuelle est de 121°8, mais en B la température d'ébullition est seulement de 120°8 ; d'où il suit que, dans le transport de A en B, la chaleur possédée par l'eau est supérieure à celle qui est nécessaire pour la faire bouillir. Cet excès de chaleur sert à engendrer instantanément de la vapeur ; la colonne est de nouveau soulevée, et l'eau inférieure est déchargée d'une partie de sa pression, il se forme plus de vapeurs depuis le milieu du tube jusqu'en bas, la masse entre soudainement en ébullition, l'eau qui est au-dessus mêlée à des nuages de vapeur, est projetée dans l'atmosphère, et nous avons l'éruption du Geyser dans toute sa grandeur.

Fig. 16.

« Par son contact avec l'air, l'eau est refroidie ; elle retombe dans le bassin, remplit partiellement le tube dans lequel elle

Digitized by Google

s'élève graduellement, et finit par remplir le bassin comme auparavant. Quelques détonations surviennent encore dans le bassin. Ce sont autant de vaines tentatives d'éruptions ; ce sera seulement quand l'eau dans le tube aura atteint une température assez rapprochée de l'ébullition pour pouvoir soulever effectivement la colonne d'eau que nous aurons de nouveau une véritable éruption.

« Nous devons cette belle théorie à M. Bunsen. Essayons maintenant de la justifier par une expérience. Voici un tube en fer galvanisé, long de 2 mètres (fig. 16) et surmonté d'un bassin. Il est chauffé en dessous par du feu et pour le placer autant que possible dans la condition du Geyser, j'ai entouré le tube d'un second foyer, à la hauteur de 60 centimètres au-dessous du fond[1]. Sans doute la haute température de l'eau au point correspondant du tube du Geyser est due à l'action locale de roches très chaudes. Je remplis le tube avec de l'eau, qui s'échauffe graduellement, régulièrement, et toutes les cinq minutes, l'eau s'élance du tube dans l'atmosphère.

« Il est donc prouvé expérimentalement que le tube du Geyser est lui-même la cause suffisante de ses éruptions, et nous voici dispensés de recourir à des cavernes souterraines remplies d'eau et de vapeur, autrefois regardées comme absolument nécessaires à la production de ces phénomènes mystérieux. »

[1] Le phénomène se produit aussi régulièrement avec le seul foyer du bas.

Digitized by Google

CHAPITRE II

ÉBULLITION EN VASE CLOS

Température d'ébullition en vase clos. — Nous savons que Dulong a vérifié expérimentalement les températures auxquelles se produit l'ébullition de l'eau sous différentes pressions, et que cette température s'élève avec la pression.

L'influence de l'accroissement de pression se fait particulièrement sentir lorsqu'on cherche à faire bouillir des liquides non plus à l'air libre, mais en vase clos, car les vapeurs qui se produisent ne trouvant aucune issue, leur tension et leur densité croissent de plus en plus avec la température. Par conséquent, tandis que dans un vase ouvert, la température d'un liquide ne peut dépasser son point d'ébullition normale, dans un vase clos, au contraire, elle peut s'élever de beaucoup au delà.

Tant que la pression intérieure dans un vase clos s'élève, la chaleur transmise par les parois ne sert qu'à élever la température de l'eau et la valeur de la pression sans que l'ébullition se produise : mais si l'élévation de la pression intérieure s'arrête à une limite, l'ébullition se manifeste dès que la température de l'eau donne pour la formule (3) page 15,

$$F = P - p + \frac{2S}{R}\left(\frac{d}{d - d'}\right)$$

une valeur de F suffisante pour que l'équation soit satisfaite ; tant que P sera une constante, la valeur de F ne changera pas : l'ébullition se continuera, la température de l'eau restera stationnaire et la chaleur transmise à l'eau par les parois du vase sera complètement absorbée par la vaporisation.

Limite de l'état liquide en vase clos. — Wolf (*Annales de Chi-*

Digitized by Google

mie et de Physique, 3e série, t. XLIX) a démontré qu'au fur et à mesure que la température s'élève la constante capillaire diminue. Lorsque de ce fait la valeur $\frac{2S}{R}$ dans la formule ci-dessus devient zéro, P ne pourra plus croître et le liquide se transformera totalement en vapeur. C'est la limite de l'état liquide.

Cagniard-Latour (*Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, vol. XXI et XXII) a vérifié expérimentalement dès 1822 ce phénomène.

Fig. 17.

Il employait un tube recourbé *a b* (fig. 17) fermé à ses deux extrémités et renfermant du mercure. La branche étroite *b*, qui est divisée en parties d'égale capacité, contient de l'air et constitue un véritable manomètre à air comprimé ; la branche large *a*, divisée aussi, contient, au-dessus du mercure, une certaine quantité du liquide qu'on étudie.

On plonge la branche *a* dans un bain-marie à température convenable. Dès que la force élastique maximum de la vapeur est supérieure à celle de l'air en *b*, le liquide émet des vapeurs et le mercure est refoulé dans la branche *b* jusqu'à ce que la pression de l'air ait acquis une valeur suffisante. En continuant à chauffer la branche *a*, l'espace occupé par la vapeur au-dessus du liquide augmente ; mais bientôt toute trace de démarcation entre le liquide et sa vapeur disparaît, et le liquide s'est vaporisé en totalité, dans un espace excessivement restreint, compris entre 2 et 5 fois son volume primitif. A ce moment on connaît la température du bain et le manomètre donne une valeur approchée de la pression.

Voici les résultats obtenus par Cagniard-Latour :

LIQUIDE	TEMPÉRATURE de volatilisation complète.	PRESSION correspondante en atmosphères.	RAPPORT du volume de la vapeur à celui du liquide.
Ether.	175°	38atm	$\frac{20}{7}$
Alcool.	248°	117atm	3
Sulfure de carbone.	258°	71atm	$\frac{5}{2}$
Eau.	Fusion du zinc.	Indéterminée	4

Digitized by Google

Ainsi pour l'eau à la température de la fusion du zinc, le volume occupé par la vapeur n'est que 4 fois plus grand que celui du liquide qui l'a engendrée.

La discussion de la formule de Regnault simplifiée relative à la chaleur de vaporisation, nous donne l'explication théorique de ce fait.

En effet la chaleur latente L à la température t est :

$$L = Q - t = 606,5 + 0,305\, t - t$$

d'où

$$L = 606,5 - 0,695\, t$$

Dans cette équation L devient zéro pour une valeur de

$$t = \frac{606,5}{0,695} = 866^\circ \text{ environ,}$$

température à laquelle la densité de la vapeur égalerait celle du liquide, en admettant que la formule de Regnault se vérifie pour toutes les températures. En réalité, pour les températures élevées qui ont pu être réalisées dans la pratique, la valeur de L mesurée directement est légèrement inférieure à celle donnée par la formule : la limite de température à laquelle l'eau n'absorbe plus de chaleur latente pour passer à l'état gazeux est très probablement inférieure à celle que donne le calcul.

Les expériences et les considérations qui précèdent démontrent que l'absorption de la chaleur latente de vaporisation est nécessitée par l'augmentation progressive du volume d'une molécule liquide qui passe à l'état gazeux, et que cette absorption se fait elle aussi progressivement, puisque lorsqu'elle est nulle *toute* la masse passe instantanément à l'état gazeux.

Ceci explique encore les différences de densité qui déterminent les courants que nous observons dans l'eau en ébullition à l'air libre, malgré l'égalité de température de toute la masse.

Marmite de Papin. — Denis Papin étudia le premier la production de la vapeur dans un vase clos.

L'appareil dont il se servit se compose d'un cylindre en laiton

Digitized by Google

très épais, fermé par un couvercle maintenu par une forte vis de pression (fig. 18). Ce couvercle est percé d'un petit trou A par lequel la vapeur s'échapperait si un levier CB chargé d'un poids P ne fermait son orifice. Quand on chauffe l'eau, la vapeur se forme peu à peu et, remplissant la chaudière, elle y exerce une pression qui augmente progressivement jusqu'à faire équilibre à l'effort exercé par le poids à l'extrémité du levier. A partir de ce moment, la pression n'augmente plus ; chaque fois qu'elle tend à s'accroître, la vapeur soulève la soupape et s'échappe ; chaque fois qu'elle diminue, l'orifice se ferme. L'ébullition se produit alors régulièrement à une température constante et d'autant plus haute que le levier est plus chargé ; quand on enlève cette soupape, un jet de vapeur s'échappe bruyamment dans l'air.

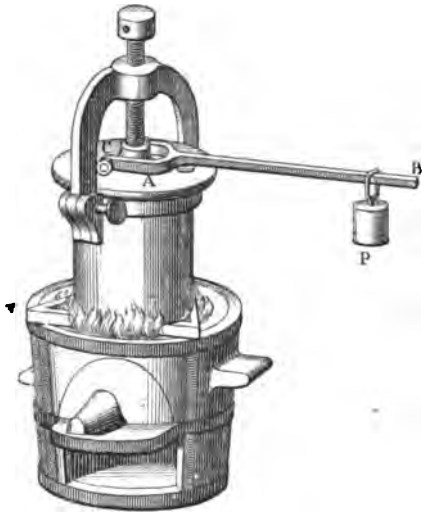


Fig. 18.

On peut alors observer que la température de la chaudière qui était à 120 ou 130°, baisse très rapidement jusqu'à 100°, et que le jet de vapeur, qui est d'abord à une température très basse, s'échauffe progressivement jusqu'à 100° à mesure qu'il se ralentit.

Ces deux faits nous montrent que :

1° L'eau de la chaudière se refroidit par l'absorption de la chaleur latente nécessaire à la formation de la vapeur qui s'échappe ;

2° La vapeur qui s'échappe dans l'atmosphère se refroidit d'autant plus que sa pression initiale lui donne une plus grande force de dilatation ou de détente.

Vapeur saturée. — Lorsque la vapeur se dégage en vase clos, sa force élastique augmente avec la température du

Digitized by Google

liquide. Si nous supposons le vase agencé pour que son volume puisse croître ou diminuer et pour que la température de la masse atteigne une limite et *s'y maintienne quelles que soient les variations de volume*, dès que cette limite est atteinte, la pression reste stationnaire : la vaporisation est arrêtée, et la quantité de vapeur qui occupe l'espace laissé libre par l'eau ne saurait varier qu'avec la température du liquide. Si l'espace augmente, le liquide fournit une nouvelle quantité de vapeur, de manière que la force élastique ou tension et la densité de celle-ci restent constantes. Si l'espace diminue, une certaine quantité de la vapeur se condense, c'est-à-dire retourne à l'état liquide, de manière à conserver à celle qui reste sa tension et sa densité primitives.

Cette loi est démontrée expérimentalement en introduisant un liquide au-dessus du mercure d'un tube barométrique.

Il y a donc à une température donnée une limite à la quantité de vapeur qui peut se former dans un espace limité : la vapeur sature alors cet espace, avec son maximum de tension et de densité correspondant à sa température. Pour exprimer cette condition, on dit que la vapeur est *saturée*. Pour qu'elle se réalise, il faut la présence d'un excès de liquide dans le vase où elle est engendrée. C'est à tort que dans la pratique on donne aux mots *vapeur saturée*, la signification de vapeur avec le maximum d'humidité normale : dans les chaudières, quelle que soit la qualité de la vapeur, sèche ou humide, elle est toujours saturée.

Mesure de la tension de la vapeur d'eau saturée. — La mesure de la force élastique de la vapeur d'eau saturée pour des températures au-dessus de 100°, a été faite expérimentalement par Dulong et Arago jusqu'à 24 atmosphères et ensuite par Regnault jusqu'à 27 atmosphères 1/2.

La méthode employée par Regnault a été aussi exacte que le permettaient des expériences si délicates et il ne reste aucun doute sur l'exactitude des mesures des températures ; les pressions étaient mesurées par un manomètre à mercure et à air libre.

La densité de la vapeur d'eau saturée a été également déterminée expérimentalement par Regnault : Fairbairn et Tate ont repris cette étude, qui a été complétée ensuite par Zeuner.

Digitized by Google

PRESSIONS EFFECTIVES en kilogr. par cent. q.	TEMPÉRATURES	TEMPÉRATURES admises par le décret de 1880.	PRESSIONS ABSOLUES en atmosphères.	PRESSIONS EFFECTIVES en kilogr. correspondant aux températures du décret.	PRESSIONS en millimètres de mercure.	CHALEURS TOTALES de vaporisation.	VOLUMES occupés par 1 kilogr. de vapeur (Regnault).	VOLUMES occupés par 1 kilogr. de vapeur (Zeuner).
							m. c.	m. c.
0k,0	100°	100°	1atm,000		760m/m	637,000	1,6995	1,6494
		111	1,4636	0k,4789	1112,09	640,350	1,1957	1,1537
0,5	111,41		1,4840		1127,8	640,48	1,18026	1,1387
		120	1,9622	0,994	1491,2	643,10	0,91261	0,8752
1,0	120,07		1,9680		1495,6	643,12	0,91017	0,8735
		127	2,4397	1,477	1854,1	645,23	0,74708	0,7139
1,5	127,15		2,4521		1863,5	645,28	0,74365	0,7105
		133	2,9206	1,984	2219,7	647,06	0,63344	0,6029
2,0	133,16		2,9361		2231,3	647,11	0,63040	0,5999
		138	3,3776	2,455	2567,0	648,59	0.55449	0,5269
2,5	138,41		3,4201		2599,2	648,71	0,54818	0,5198
		143	3,8904	2,985	2956,8	650,11	0,48724	0,4609
3,0	143,11		3,9041		2967,0	650,14	0,48571	0,4591
		147	4,3446	3,454	3301,8	651,33	0,44053	0,4152
3,5	147,35		4,3882		3334,8	651,44	0.43653	0,4113
		151	4,8400	3,966	3678,4	652,55	0.39921	0,3751
4,0	151,23		4,8722		3702,7	652,62	0,39700	0,3729
4,5	154,82		5,3562		4070,5	653,66	0,36399	0,3411
		155	5,3797	4,524	4088,5	653,77	0,36256	0,3320
		158	5,8151	4,973	4419,4	654,69	0,33776	0,3157
5,0	158,15		5,8403		4438,4	654,73	0,33642	0,3145
		161	6,2780	5,452	4771,2	655,60	0,31504	0,2972
5,5	161,27		6,3243		4806,2	655,68	0,31292	0,2918
		164	6,7697	5,960	5144,9	656,52	0,29418	0,2738
6,0	164,22		6,8083		5174,0	656,58	0,29265	0,2723
		167	7,2913	6,498	5541,4	657,43	0,27501	0,2553
6,5	167,01		7,2924		5541,9	657,44	0,27499	0,2553
7,0	169,62		7,776		5902,16	658,23	0,25939	0,2403
		170	7,8443	7,070	5961,66	658,35	0,25737	0,2383
7,5	172,13		8,260		6277,60	658,997	0,24557	0,2260
		173	8,4297	7,674	6406,60	659,265	0,24112	0,2227

Digitized by Google

PRESSIONS EFFECTIVES en kilogr. par cent. q.	TEMPÉRATURES	TEMPÉRATURES admises par le décret de 1880.	PRESSIONS ABSOLUES en atmosphères.	PRESSIONS EFFECTIVES en kilogr. correspondant aux températures du décret.	PRESSIONS en millimètres de mercure.	CHALEURS TOTALES de vaporisation.	VOLUMES occupés par 1 kilogr. de vapeur (Regnault).	VOLUMES occupés par 1 kilogr. de vapeur (Zeuner).
							m. c.	m. c.
8k,0	174°,52		8,744		6645,44	659,728	0,23322	0,2152
		175°	8,8387	8k,097	6717,43	659,875	0,23099	0,2131
8,5	176,81		9,228		7015,28	660,425	0,22212	0,2046
		177	9,2631	8,525	7039,97	660,485	0,22140	0,2039
		179	9,7033	8,990	7374,52	661,095	0,21229	0,1952
9,0	179,03		9,712		7381,12	661,104	0,21209	0,1950
		181	10,1597	9,462	7721,37	661,705	0,20365	0,1870
9,5	181,14		10,196		7748,96	661,747	0,20297	0,1863
		183	10,6327	9,950	8080,84	662,315	0,19545	0,1791
10,0	183,17		10,680		8116,80	662,368	0,19445	0,1784
		185	11,1226	10,465	8453,23	662,925	0,18766	0,1717
10,5	185,15		11,164		8484,64	662,970	0,18701	0,1711
		187	11,630	10,981	8838,82	663,535	0,18026	0,1647
11,0	187,05		11,648		8852,48	663,550	0,17998	0,1644
11,5	188,92		12,132		9220,32	664,120	0,17350	0,1582
		189	12,1542	11,522	9237,25	664,145	0,17324	0,1579
12,0	190,75		12,616		9588,16	664,678	0,16751	0,1525
		191	12,6986	12,084	9650,93	664,755	0,16653	0,1516
12,5	192,51		13,100		9703,00	665,215	0,16193	0,1473
		193	13,2605	12,665	10078,04	665,365	0,16016	0,1456
		194	13,5487	12,963	10297,01	665,670	0,15709	0,1427
13,0	194,11		13,584		10323,84	665,703	0,15635	0,1423
13,5	195,77		14,068		10691,68	666,209	0,15184	0,1377
		196	14,1394	13,573	10745,92	666,280	0,15117	0,1370
		197	14,4408	13,884	10975,97	666,585	0,14834	0,1343
14,0	197,35		14,552		11059,52	666,591	0,14729	0,1334

Les tables précédentes sont calculées d'après celles de Regnault et de Zeuner. Dans la pratique la tension de la vapeur d'eau est toujours mesurée en prenant pour unité la pression exercée par un kilogramme sur un centimètre carré dans l'atmosphère

Digitized by Google

normale de 760 m/m de mercure ; nous avons cru utile de donner les valeurs correspondant à des écarts de pression de 500 en 500 grammes au-dessus de la pression atmosphérique.

Les températures notées aux tables qui précèdent sont celles de la vapeur et de la surface de l'eau en ébullition aux pressions correspondantes, mais la température de l'eau augmente au fur et à mesure que s'accroît le poids de la colonne qui comprime les couches où la vapeur est engendrée : connaissant la hauteur et la densité de cette colonne, on peut déterminer par le calcul, en se servant des tables complètes de Regnault ou de Zeuner, les températures des couches profondes en contact avec les parois chauffées.

Vitesse de dégagement d'une bulle de vapeur. — La vitesse de dégagement d'une bulle de vapeur en vase clos est plus faible que celle d'une bulle de même volume se dégageant à l'air libre, car la densité du liquide déplacé est moindre, et le poids de la bulle plus grand : la vitesse devient donc d'autant plus faible que la pression est plus considérable ; à poids égal, les poussées diminuent dans le rapport des volumes déplacés.

L'étude des phénomènes capillaires dans la formation de bulles de vapeur nous a montré qu'il y avait, à une température donnée, une limite minima au rayon primitif de la bulle d'air qui détermine la formation de la bulle de vapeur : plus la température s'élève, plus la force élastique de la vapeur est grande, et plus la pression capillaire diminue et la limite du rayon primitif s'abaisse. La production des bulles de vapeur devient donc de plus en plus facile à mesure que la température de l'ébullition s'élève par accroissement de pression.

Considérations de Peclet sur l'ébullition en vase clos. — Voici comment Péclet (*Traité de la Chaleur*, vol. II) analyse les phénomènes relatifs à l'ébullition de l'eau en vase clos :

« Comme les métaux sont très bons conducteurs de la chaleur, et que les chaudières n'ont jamais qu'une faible épaisseur, la différence de température des deux surfaces est toujours très petite et peut être négligée. Au commencement du chauffage,

Digitized by Google

lorsque l'eau est à une température peu différente de la température extérieure, comme l'eau est un mauvais conducteur, la chaleur se transmet peu de couche en couche ; elle ne se répartit dans la masse que par de doubles courants résultant des différences de température et, par suite, de densité, quand l'échauffement du vase a lieu par la partie inférieure. Quand les couches de liquide qui touchent le métal ont atteint la température de l'ébullition, correspondant à la pression dans le réservoir de vapeur, elles s'élèvent encore à l'état liquide, parce que la pression qu'elles supportent excède celle du réservoir de toute la hauteur de l'eau et elles se transforment en partie en vapeur au niveau de l'eau ; mais à mesure que leur température augmente, elles se vaporisent à des hauteurs décroissantes ; et bientôt elles se forment sur le fond du vase, et la vapeur se détend à mesure qu'elle s'élève. Ainsi, la température de la vaporisation au fond du vase est plus grande que celle du réservoir de vapeur ; mais la différence est en général très petite ; car, pour une chaudière renfermant une hauteur d'eau de 10,33 mètres, la différence de température serait celle qui correspond à une différence de pression d'une atmosphère ; la pression dans le réservoir étant de 1 atmosphère 1/2, la différence de température serait de 16° ; si la pression était de 5 atmosphères dans le réservoir, l'excès de température serait seulement de 7°. Dans ce que nous venons de dire, nous n'avons pas fait intervenir l'attraction du liquide pour le métal, mais il est évident que si cette attraction est notable, elle s'opposera à la vaporisation, qui n'aura lieu qu'à une température plus élevée, quand la force répulsive de la chaleur aura contre-balancé cette attraction ; alors l'ébullition ne sera plus continue ; elle aura lieu brusquement, à des intervalles plus ou moins rapprochés, parce que l'eau en contact avec le métal devra prendre constamment un certain excès de température sur l'eau environnante.

« Dans tous les cas, il est très probable que les bulles de vapeur, avant de se détacher, prennent d'abord la forme d'une demi-sphère dont la base s'appuie sur la chaudière, et qui se complète progressivement et ne se détache que quand elle ne touche plus la chaudière que par un cercle très petit relative-

Digitized by Google

ment à son diamètre ; du moins c'est ce qui arrive pour l'air qui se dégage de l'eau par une diminution de pression. S'il en était réellement ainsi, tous les points de la surface intérieure ne seraient pas constamment mouillés par l'eau, et par conséquent la température de cette surface serait plus élevée que celle de l'eau d'une quantité très notable, et bien supérieure à la différence très petite qu'exigerait la transmission régulière de la chaleur. Mais alors n'y aurait-il pas à craindre que, si la production de vapeur était très active, la différence de température du métal et de l'eau n'atteignit celle qui empêcherait l'eau de mouiller le métal, circonstance qui arrêterait l'ébullition, pour la produire avec explosion lorsque, par une circonstance quelconque, la température du métal s'abaisserait ? »

Remarque sur les considérations de Péclet. — Péclet fait ici allusion aux phénomènes de la caléfaction, qui montrent que l'état sphéroïdal de l'eau se manifeste dès qu'à l'air libre la température du métal atteint 170°. Si le même phénomène se produisait en vase clos, et en admettant que la température du métal fût exactement celle de l'eau, toutes les chaudières fonctionnant à des pressions effectives de 6 kilogrammes et demi et au delà, ne contiendraient que de l'eau à l'état sphéroïdal.

L'étude du phénomène de la caléfaction nous a montré qu'en cet état particulier du liquide la production de vapeur est de beaucoup inférieure à celle qui se forme à une température plus basse, lorsque le liquide mouille le métal. Si l'état sphéroïdal se produisait dans ces conditions, une diminution considérable dans la puissance de vaporisation des surfaces de chauffe devrait se produire dès que la tension de la vapeur atteindrait la limite correspondant à la température de 170° pour le métal.

La pratique démontre que dans les conditions ordinaires le phénomène de la caléfaction ne se produit plus en vase clos à 170°, car la puissance de vaporisation des surfaces de chauffe des générateurs de vapeur n'est pas affectée par l'élévation de la température du métal au delà de 170°.

Digitized by Google

Impossibilité de l'état sphéroïdal en vase clos. — Les expériences de Romilly (voir p. 17), de Wolf (voir p. 22) et de Gossart (voir p. 23) démontrent que pour que l'état sphéroïdal de l'eau puisse se produire, il faut que la valeur T_m de la pression capillaire sur l'unité de surface (le millimètre carré) fasse équilibre à la pression P_m qu'exerce la colonne d'eau sur sa base de 1 millimètre carré

$$T_m = P_m$$

Si dans cette équation la colonne d'eau s'accroît, P augmente, alors que T reste stationnaire : le liquide obéit alors aux lois de la pesanteur, et si l'expérience a lieu sur une surface non limitée latéralement, le globule d'eau qui garde la forme sphérique tant que son volume est faible, s'aplatit de plus en plus pour que dans tous les points de la surface inférieure l'équation soit satisfaite. La force répulsive que nous avons vu s'exercer entre les molécules solides et les molécules liquides se transforme en travail, en mettant en mouvement la masse du liquide. Cette condition ne se réalise pas dans la pratique en vase clos : P y atteint toujours des valeurs considérables et pour que le liquide ne mouille plus le métal, il faut que la température de celui-ci s'élève pour chaque cas particulier jusqu'à ce que la répulsion qui s'exerce sur les molécules liquides à plus basse température, en venant s'ajouter à la valeur de la tension superficielle puissent faire équilibre à la colonne d'eau.

L'expérience de Romilly relatée page 17, figure 10, nous servira pour la vérification expérimentale de cette loi. Si la température du liquide dans lequel plonge le récipient *d* est suffisamment élevée pour que la condensation totale de la vapeur produite dans le flacon *a* ne s'effectue pas à mesure de son dégagement, la force élastique de la vapeur augmentera progressivement et l'eau filtrera à travers les mailles.

Si l'on a noté la hauteur de la colonne d'eau dans le flacon et la température accusée par un thermomètre à air remplaçant les thermomètres à mercure *t*, qui ne sont pas assez sensibles pour cette observation, et que l'on recommence l'expérience avec une hauteur d'eau moindre dans le flacon, on voit que la température

Digitized by Google

et par suite la force élastique de la vapeur atteignent les limites de l'observation précédente sans que le phénomène observé se produise ; ce n'est qu'avec un accroissement de température et de force élastique de la vapeur que l'eau passe à nouveau à travers les mailles.

L'expérience ayant lieu à l'air libre, l'accroissement de la force élastique de la vapeur au-dessus de la surface de l'eau correspond à une augmentation de la hauteur de la colonne d'eau en vase clos. Par le calcul on vérifie que pour chaque cas la hauteur de la colonne d'eau qui ne fait plus équilibre à la tension superficielle du ménisque convexe qui la supporte est toujours la même.

Le même phénomène peut être reproduit en faisant varier la hauteur de la colonne d'eau dans l'expérience de M. Hirsch que nous avons relatée page 20 et en faisant varier l'intensité de la source de chaleur.

Expérience de M. Witz. — M. A. Witz (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, vol. CXIII) a fait sur la question de l'état sphéroïdal en vase clos les expériences très intéressantes qui suivent :

« Il importait d'abord de déterminer l'intensité de l'évaporation avant et après l'état sphéroïdal, dans les conditions de l'expérience classique.

« On a opéré dans une large cuiller de fer, chauffée d'abord au bain-marie de mercure, puis à feu nu, dans laquelle on projetait 40 grammes d'eau distillée, en relevant avec soin le temps nécessaire à la vaporisation complète du liquide ; voici les résultats obtenus :

Poids d'eau.	Durée de la vaporisation.	Température du métal.
40	2',0"	141°
40	0,38	194
40	0,25	243
40	0,22	260
40	0,20	320
40	10,20	Rouge-cerise.

« Ainsi à l'état sphéroïdal, la puissance d'évaporation d'une même surface devient 31 fois moindre au rouge qu'à 320° ; voilà bien le phénomène décrit dans les traités de physique. Il est caractérisé nettement par un maximum de la puissance de vapo-

Digitized by Google

risation, suivi tout à coup d'une chute profonde : une courbe représenterait bien aux yeux cette succession d'effets[1].

« Opérons maintenant dans une chaudière et voyons comment les choses se passent. S'il y a état sphéroïdal il sera dénoncé par ce maximum à la suite duquel l'évaporation deviendra 31 fois

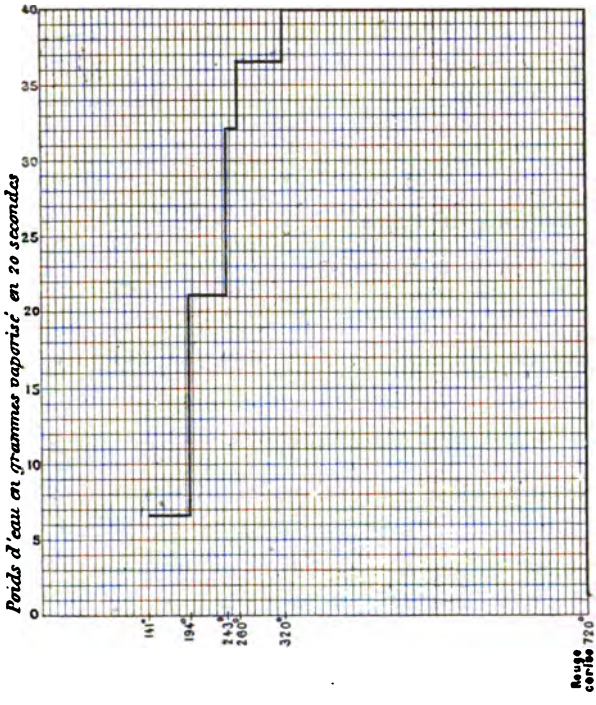


Fig. 19.

moindre. Par contre s'il n'y a pas de maximum et qu'au contraire la vaporisation croisse continuellement avec la température du métal, ne serons-nous pas autorisés à affirmer que l'état sphéroïdal ne se produit pas dans les chaudières industrielles ? Cette conclusion serait dans ce cas absolument indiscutable. »

M. Witz a ensuite opéré sur une chaudière cylindrique dont le fond plat circulaire qui mesurait 3,017 décimètres carrés était amovible et pouvait être constitué par des lames de tôle de 1 millimètre à 12 millimètres d'épaisseur. La chaudière renfermait de l'eau

[1] La figure 19 est le tracé de cette courbe.

Digitized by Google

distillée sur une hauteur de 80 millimètres et un appareil d'alimentation assurait la constance du niveau du liquide et permettait de mesurer avec une grande précision la quantité d'eau débitée.

Les résultats de ces essais sur une tôle de 12 millimètres sont consignés dans le tableau suivant :

FOYER	PRESSION atmosphérique.	TEMPÉRATURE d'alimentation.	QUANTITÉ d'eau évaporée par mètre carré et par heure.
7 brûleurs Bunsen	745m/m	15°	63k,3
7 brûleurs Bunsen + 1 chalumeau soufflé.	758	16	179,4
7 brûleurs Bunsen + 1 chalumeau oxhydrique	758	18	200,9
7 brûleurs Bunsen + 3 chalumeaux oxhydriques	753	19	263,2
Feu de coke intense.	760	19	433,5

« Dans ces expériences, la tôle n'a jamais rougi sous l'eau ; les contacts du métal et du liquide étaient assurés par un soigneux décapage préalable ; les supports de la chaudière étaient, par contre, au rouge blanc. L'évaporation est tumultueuse et bruyante, et le liquide est violemment agité en tous sens.

« Suspendons l'alimentation jusqu'à évaporation complète de l'eau, la tôle rougit aussitôt. Alimentons alors ; nous sommes donc bien dans les conditions pratiques d'une chaudière ayant rougi par manque d'eau. Les résultats obtenus sont réunis dans le tableau suivant :

FOYER	PRESSION atmosphérique.	TEMPÉRATURE d'alimentation.	QUANTITÉ d'eau évaporée par mètre carré et par heure.
7 brûleurs Bunsen. { 1 chalumeau soufflé. . .	754m/m	14°	662k,8
7 brûleurs Bunsen. { 1 chalumeau oxhydrique.	754	14	662,8
Feu de coke intense	760	90	994,3

« Dans ces derniers essais, le rouge s'est maintenu sous l'eau,

Digitized by Google

en alimentant à 14°; l'alimentation chaude ne l'a même pas assombri, et l'évaporation a atteint ce chiffre colossal de 994 kilogrammes.

« Nous en concluons que l'effet Boutigny ne se produit pas dans les chaudières sur les tôles rougies, mais que la vaporisation est d'une activité qui mérite d'arrêter l'attention des savants et des ingénieurs. »

La communication de cette note a provoqué une réclamation de priorité de la part de M. de Swarte (*Comptes rendus, Académie des Sciences*, vol. CXIV), qui a publié en 1886 des résultats d'expériences, prouvant également que l'état sphéroïdal ne se produit pas sur des plaques au rouge cerise. M. de Swarte a ainsi obtenu des chiffres d'eau vaporisée par mètre carré et par heure, dépassant 1 600 litres : mais ses observations n'ont pas la valeur de celles de M. Witz, car celui-ci dans sa réponse à la réclamation de M. de Swarte (*Comptes Rendus, Académie des Sciences*, vol. CXV) nous indique que ses expériences *entreprises d'après le procédé inauguré par M. Hirsch, sont continues et peuvent être poursuivies pendant des heures.* Elles ont donc un caractère d'exactitude qui manque à celles de M. de Swarte, dont la durée des expériences n'était que de quelques secondes.

Dans sa communication M. Witz ne donne pas d'indications sur les calculs effectués d'après les expériences pour dresser ses tableaux de vaporisation par mètre carré de surface de chauffe. Il est évident qu'une partie de l'eau a été vaporisée par la paroi cylindrique de la chaudière d'expérience, et que cette surface, sur une hauteur de 80 millimètres, doit être comprise dans le calcul de la surface de chauffe. Il eût été intéressant de voir cette lacune comblée.

Causes empêchant le contact de l'eau et du métal. — Nous savons que si le liquide mouille le métal un accroissement de température est impossible, quelle que soit l'intensité du feu, mais que si par une cause quelconque (le corps gras calciné dans les expériences de M. Hirsch, l'absence totale du liquide dans celles de M. Witz) la température du métal s'élève sur celle cor-

Digitized by Google

respondant à l'ébullition de l'eau, dès que l'écart est suffisant pour que l'action répulsive du métal, en s'ajoutant à la tension superficielle, puisse faire équilibre à la colonne d'eau qui surplombe, le contact entre le liquide et le métal ne peut plus s'effectuer.

Malgré l'absence de ce contact, l'état sphéroïdal ne se produit pas, car l'énergie calorifique émise par la paroi du métal ne se transforme pas en travail mécanique, et elle est absorbée par la vaporisation de la surface de l'eau en regard de la tôle. Mais dès que la quantité de chaleur émise par la paroi métallique dépasse celle qui peut être absorbée par la vaporisation, elle agit mécaniquement : l'équilibre est rompu et toute la masse d'eau est mise en mouvement et se soulève.

Mesure de la tension superficielle. — Laplace, Athanase Dupré, Plateau, Poisson, Gauss, Quincke, Ed. Desains, etc., ont étudié particulièrement les phénomènes de la tension superficielle, et la mesure de sa valeur. Elle est pour l'eau d'environ 8,253 milligrammes par millimètre. Ce chiffre qui paraît faible à première vue, représente toutefois des forces d'une importance considérable, car la couche sur laquelle elles s'exercent est déterminée par le rayon d'activité moléculaire, dont la valeur a été fixée aux environs de 5 cent millièmes de millimètre. Si nous adoptons cette épaisseur pour l'eau, nous voyons qu'un centimètre cube d'eau peut s'étaler en une lame dont la surface sera de 10 mètres carrés : si nous la supposons étalée en un ruban de un centimètre de largeur, la tension superficielle de ses deux faces permettrait de suspendre à ce ruban une charge égale à environ 16 506 fois son poids. Si nous supposions ce ruban réduit à la hauteur de un vingt millième de millimètre, c'est-à-dire au rayon d'activité moléculaire, il supporterait sans se rompre 3 300 tonnes.

Effets de la tension superficielle de l'eau. — La nature nous montre une grandiose vérification du phénomène de la tension superficielle de l'eau dans la formation des vagues : les molécules d'air, animées d'une vitesse considérable, viennent frapper la sur-

Digitized by Google

face de l'eau et ne peuvent pénétrer dans la masse à cause de la résistance opposée par la couche élastique superficielle : elles creusent la surface en soulevant, à cause de l'incompressibilité de l'eau, un volume d'eau égal à celui déplacé par l'air. En substituant à la valeur de la tension superficielle de l'eau de mer au contact de l'air, celle d'un corps ayant une tension superficielle moindre dans les mêmes conditions, comme l'huile, on modifie profondément le régime des vagues. Ignorant les lois de la physique moléculaire, les marins depuis longtemps savaient apaiser la colère des flots en jetant de l'huile à la mer. La quantité d'huile nécessaire est très faible, car elle s'étale en couche très mince, dont on suppose l'épaisseur s'approcher de la valeur du rayon d'attraction moléculaire : en pratique on la verse goutte à goutte, et pour un navire en marche, un débit de deux litres à l'heure suffit à calmer la mer à une assez grande distance.

TABLEAU DE LA VALEUR DE LA TENSION SUPERFICIELLE POUR QUELQUES LIQUIDES

LIQUIDES	VALEUR DE S, POUR LA SURFACE DE SÉPARATION AVEC			AUTORITÉS
	l'air	l'eau	le mercure	
Eau	8mgr,2	»	42mgr,6	Quincke.
Eau à 8°,5	7,5	»	»	Desains.
Eau à 0°	7,7	»	»	Brunner.
Eau à 8°,5	7,5	»	»	Hagen.
Eau en ébullition	6	»	»	Gossart.
Solution de sel marin	8,4	»	»	Frankenheim.
Mercure	54,9	42mgr,6	»	Quincke.
Sulfure de carbone	3,3	4,3	40	Id.
Chloroforme	3,1	3	40,7	Id.
Chloroforme en ébullition	2,4	»	»	Gossart.
Alcool	2,6	»	40,7	Quincke.
Alcool	2,3	»	»	Wilhelmy.
Alcool méthylique en ébullition	1,9	»	»	Gossart.
Ether	1,9	»	»	Bède.
Ether en ébullition	1,5	»	»	Gossart.
Huile d'olive	3,8	2,1	34,2	Quincke.
Essence de térébenthine	3	1,2	25,5	Id.
Pétrole	3,2	2,8	28,9	Id.

Digitized by Google

Surchauffe des parois. — La surchauffe des parois d'un vase clos dans lequel on provoque l'ébullition de l'eau, ne peut se produire tant que le liquide est en contact avec la paroi, mais dès que pour une cause quelconque la paroi peut prendre un excès de température sur celle de l'eau, elle se produit inévitablement.

On a affirmé que cette surchauffe devait se produire en vase clos, lorsque par suite d'une grande production de vapeur, la paroi chauffée se trouvait en contact avec une émulsion ou mousse d'eau et de vapeur. Les lois de la capillarité nous démontrent qu'émulsion et mousse sont deux phénomènes distincts, qu'ils ne peuvent, ni l'un ni l'autre, se produire au sein du liquide d'une chaudière, et que cette supposition et les conséquences qu'on en a tirées sont erronées.

Emulsion. — Le phénomène de l'émulsion consiste dans la division extrême, en petits globules, d'un liquide en suspension dans la masse d'un autre liquide. C'est toujours le liquide le plus dense qui est en suspension, et pour que le phénomène se produise il faut la présence d'un troisième liquide moins dense que celui dans lequel l'émulsion se fait, afin que la somme des tensions superficielles des trois liquides entre eux soit inférieure à celle du liquide émulsionnant et émulsionné entre eux. Si l'on agite du mercure et de l'eau en petite quantité, on n'obtiendra que la séparation immédiate des deux liquides dès qu'on cesse d'agiter, mais si l'on ajoute un peu d'huile d'olive, on obtient à la longue une masse grise, visqueuse, formée de très petites gouttes de mercure, enveloppées d'une pellicule d'huile en suspension dans l'eau.

D'après le tableau de la page 45 nous savons que les valeurs des tensions superficielles des surfaces de contact sont dans ce cas

Surface eau-mercure.		$42^{mgr},6$
Surface eau-huile	$2^{mgr},1$	$36^{mgr},3$
Surface huile-mercure	$34^{mgr},2$	
Différence.		$6^{mgr},3$

Dans le phénomène de l'émulsion il y a donc absorption

Digitized by Google

d'énergie, et pour que le mercure déchire la couche d'huile et vienne au contact de l'eau il faut un travail correspondant à 61,8 ergs[1] par centimètre carré. Ce travail est développé par la pesanteur, mais plus la division du mercure est grande, moindre sera la masse de ces globules et plus l'émulsion sera stable ; l'émulsion est donc un état particulier d'un corps liquide en antagonisme avec les lois de la gravitation.

En assimilant l'état gazeux à l'état liquide, pour qu'une émulsion d'eau et de vapeur puisse se réaliser il faudrait que l'eau fût en suspension dans la vapeur, par l'intermédiaire d'un corps moins dense que celle-ci, afin qu'il se produise une absorption d'énergie par diminution de la tension superficielle eau-vapeur. Ce phénomène ne peut se réaliser dans les chaudières ; mais il se produit dans l'atmosphère : l'eau s'émulse dans l'air par l'intermédiaire de la vapeur pour former les nuages et les brouillards.

Mousse. Ecume. — Dans les générateurs de vapeur c'est le phénomène contraire qui se manifeste : celui des écumes. Si on agite de l'air avec de l'eau très pure, il ne se forme jamais d'écume ou mousse : mais si l'eau est légèrement additionnée d'un corps gras, il se forme immédiatement une mousse persistante à la surface. Dès qu'une bulle gazeuse est emprisonnée dans la masse liquide, une pellicule du corps gras s'étale à la surface.

La valeur des tensions superficielles étant dans ce cas :

Eau-air		$8^{mgr},253$
Eau-huile.	$2^{mgr},096$	$5^{mgr},856$
Huile-air	$3^{mgr},760$	
La différence est de.		$2^{mgr},397$

soit un travail de 23,5 ergs par centimètre carré qui doit être

[1] Dans le système de mesure C. G. S. (centimètre, gramme, seconde) l'unité de force fondamentale est la *dyne*, qui correspond à l'accélération de 1 centimètre par seconde de la masse de 1 gramme. Au niveau de la mer l'accélération due à la gravité sur la masse de 1 gramme tombant dans le vide est de $9^{m},81$ par seconde. Le poids de 1 gramme vaut donc au niveau de la mer (et à Paris) 981 dynes, le milligramme 0,981 dynes ; 6,3 milligrammes par millimètre correspondent donc à 61,8 dynes par centimètre. L'*erg* est l'unité de travail : il correspond à 1 dyne dont le point d'application se déplace de 1 centimètre.

Digitized by Google

développé pour que la déchirure de la pellicule de graisse mette l'air au contact de l'eau.

Ici, contrairement à ce qui se passe dans le phénomène de l'émulsion, l'action de la gravité sur le corps le plus dense, l'eau, s'ajoute à la résistance qu'éprouve la bulle de gaz pour rompre son enveloppe et tend à rendre la mousse plus stable : celle-ci ne disparaît que par évaporation de la pellicule liquide.

Si donc nous supposons un corps gras en suspension dans la masse d'eau en ébullition, cette présence en diminuant la tension superficielle eau-air, facilitera le dégagement de la vapeur au sein du liquide et il n'y aura que formation d'écume ou de mousse, celle-ci étant essentiellement caractérisée par l'*accumulation à la surface libre seulement*, de bulles gazeuses ne pouvant déchirer la mince pellicule du corps gras qui les sépare du contact de l'eau. L'importance de cette mousse à la surface libre peut être considérable et amener de graves inconvénients.

Sur une section des chemins de fer belges, on alimentait les locomotives au moyen des eaux provenant des charbonnages de Gilly et de Charleroi. A 6 ou 7 atmosphères, l'eau et la vapeur sortaient à l'état de brouillard par les tuyaux de décharge ; après 2 ou 3 kilomètres, on était obligé de jeter bas les feux des locomotives. Il n'en était pas de même dans les générateurs fixes, où la pression ne dépassait pas 5 atmosphères. Cette eau analysée par M. Stoclet, était d'une couleur brune paraissant due à une substance en suspension et très tenue, qui se déposait en noir sur le filtre, et qui traitée par l'éther, abandonnait à ce liquide une substance jaunâtre, à odeur empyreumatique qu'on obtenait par évaporation ; cette substance peut être obtenue directement du lavage de la houille de ces bassins à l'éther ; elle existait dans la matière en suspension, car l'eau filtrée ne la fournissait pas. Cette substance étant desséchée, restait solide à 100° et se liquéfiait et se boursouflait à une température supérieure. C'est elle qui favorisait la formation des écumes en devenant visqueuse à la température de l'eau des locomotives, tandis que dans les machines fixes la température plus basse de l'eau n'amenait pas ce résultat.

Digitized by Google

Matelas de vapeur. — Ce n'est donc pas à des phénomènes d'écume ou d'émulsion eau-vapeur en présence des surfaces chauffées qu'on doit attribuer la surchauffe de ces parois ; mais à d'autres causes accidentelles qui permettent à la paroi de prendre un excès de température sur le liquide, et d'exercer ainsi une action répulsive sur la masse d'eau.

Lorsque la paroi chauffée est plane et horizontale, la production du matelas de vapeur entre la paroi et l'eau qui se trouve au-dessus, ne peut se produire que si le poids de la colonne d'eau qui la mouille ait une valeur assez faible pour que la pression capillaire puisse l'équilibrer. En pratique, une surface plane est toujours armée ou entretoisée : les armatures ou entretoises se trouvent dans la masse d'eau, elles transmettent de la chaleur au liquide d'autant plus que la paroi en transmet moins et le dégagement de vapeur qu'elles provoquent se faisant facilement en raison même de la faible valeur de la colonne d'eau, la surchauffe d'une paroi plane horizontale entretoisée du côté de l'eau se produit rarement, si elle n'a pas été complètement dégarnie.

Il en serait autrement si les dispositions d'entretoisement étaient du côté opposé à celui mouillé par l'eau.

On peut facilement vérifier ce qui précède par l'expérience suivante due à M. Melsens, de l'Académie Royale de Belgique.

Un vase métallique (fig. 20) est divisé en deux compartiments : dans l'un A on a inséré sur le fond une série de tiges métalliques effilées alors que l'autre B est complètement nu. En chauffant les deux compartiments par deux becs Bunsen d'égale intensité, ils sont portés rapidement au rouge, et si l'on y fait tomber de l'eau par petits filets on voit que dans le vase A elle s'accumule, que la vaporisation est très active et que le rouge disparaît, tandis qu'il est impossible de conserver l'eau dans le vase B qui reste toujours au rouge : elle est projetée en dehors à mesure qu'on la verse.

Avec raison M. Melsens conseillait de protéger les surfaces de chauffe directes des chaudières par des séries de chevilles ou tiges se prolongeant dans la masse du liquide ; mais ces appendices intérieurs, possibles avec l'emploi d'eau distillée pour l'alimen-

Digitized by Google

tation, présenteraient de graves inconvénients si les eaux formaient des dépôts.

Le matelas de vapeur peut au contraire se produire avec la plus grande facilité le long de parois chauffées placées verticalement ou inclinées : les bulles de vapeur produites le long des surfaces ainsi disposées ne s'élèvent qu'en suivant les parois ; celles produites par les parties les plus basses s'agglomèrent aux bulles qui se dégagent sur les parties supérieures, et, si la production de vapeur est tant soit peu active, la cloison gazeuse séparatrice entre l'eau et la paroi chauffée s'établit facilement. Par assimilation de ce qui précède, si la paroi chauffée était celle intérieure d'un cylindre placé horizontalement, la cloison s'établit avec encore plus de facilité à cause de l'obstacle qui s'oppose au dégagement de la vapeur dans la partie supérieure du cylindre, où les bulles gazeuses qui suivent la paroi doivent parcourir horizontalement un chemin considérable par rapport au chemin vertical qui est le seul en harmonie avec les lois de la pesanteur.

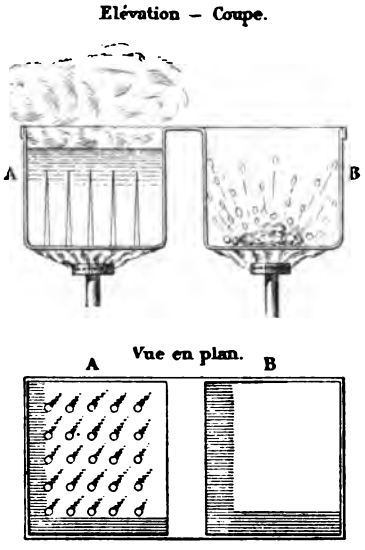


Fig. 20.

Dès que la cloison de vapeur s'établit, la température de la paroi chauffée s'accroît considérablement, et comme nous le verrons plus loin, il en résulte de graves accidents.

La lame gazeuse verticale explique pourquoi dans le type de chaudière employé pour la machine locomotive le ciel du foyer produit beaucoup plus de vapeur que les parois verticales, et se détériore beaucoup moins rapidement.

Parois de coup de feu. — Les parois exposées directement à la source de chaleur sont seules sujettes à ces inconvénients et à cette surchauffe; l'élévation de température dans les chaudières

Digitized by Google

industrielles peut atteindre ainsi une valeur assez considérable pour produire un ramollissement du métal, qui cède alors sous l'effort de la pression intérieure et gonfle. Cette altération du métal s'appelle coup de feu, et les parois exposées directement à la source de chaleur sont appelées par analogie surfaces de coup de feu.

Influence des sels en dissolution dans l'eau. — La pratique enseigne que la puissance de vaporisation d'un générateur de vapeur s'accroît lorsque la surface métallique intérieure est recouverte d'une très légère couche de dépôts non graisseux : d'où l'on a conclu que les bulles de vapeur formées contre une paroi tapissée de ces matières se détachent plus facilement que si elles sont produites contre une surface métallique. Ces substances étant poreuses correspondent, en couche infiniment mince, à une augmentation de la surface de chauffe.

Il faudrait toutefois se garder de laisser prendre à ces dépôts une épaisseur appréciable, car ils sont très mauvais conducteurs de la chaleur et produiraient sur les surfaces de coup de feu un effet analogue à celui des cloisons de vapeur : il faut donc se préoccuper d'empêcher la formation de ces dépôts.

Les eaux introduites dans les chaudières y laissent par leur vaporisation toutes les matières qu'elles contenaient en dissolution et en suspension. Il n'y a pas dans la nature d'eau chimiquement pure : les propriétés dissolvantes dont elle jouit à l'égard de la plupart des corps solides et gazeux sont cause d'une altération quelconque de l'eau, soit qu'elle ait filtré au travers des couches du sous-sol pour aller former plus loin une nappe souterraine ou venir sortir au jour en source jaillissante, soit qu'elle coule en masse plus ou moins considérable à la surface de la terre, sous forme de ruisseau, de rivière ou de fleuve ; on y retrouvera toujours, en la soumettant à l'analyse, des traces de matières étrangères empruntées aux terrains qu'elle a traversés. Il est facile de s'en assurer par l'évaporation d'une quantité d'eau déterminée ; on constatera, en effet, à la fin de l'opération, l'existence d'un résidu solide plus ou moins abondant.

Digitized by Google

Parmi les substances solides ainsi entraînées par l'eau, il faut placer en premier lieu le carbonate de chaux, dont la proportion dominante se constate facilement dans la plupart des dépôts recueillis sur les parois des chaudières. Le sulfate de chaux, moins fréquemment rencontré, apparaît cependant en proportion assez importante dans les eaux de certaines localités, et constitue alors à son tour, mais plus rarement, la majeure partie des résidus. Nous connaissons des eaux dans lesquelles le sulfate de chaux forme les 8 10 des dépôts. Les sels qui se rencontrent ensuite le plus fréquemment sont les carbonates et les sulfates de magnésie; enfin du chlorure de sodium, des sels de potasse et de soude, et une foule d'autres matières minérales et organiques accompagnent le plus souvent, mais en faible proportion, ces quatre substances principales.

Les carbonates de chaux et de magnésie, éléments principaux des dépôts les plus communs, possèdent une très faible solubilité dans l'eau pure. Ils sembleraient par cela même devoir être écartés des résidus laissés par l'évaporation de ce liquide. Mais grâce à la présence du gaz acide carbonique en dissolution, l'eau acquiert la propriété de dissoudre une proportion assez considérable des sels en question, qui se bicarbonatent; de telle sorte que les carbonates de chaux et de magnésie, qui résisteraient à l'action de l'eau pure, se trouvent dissous à la faveur d'un excès d'acide carbonique, que les eaux naturelles renferment souvent en assez grande abondance. Aussi lorsque ce gaz, par une cause quelconque, abandonne l'eau, celle-ci se débarrasse, à son tour, des carbonates sous forme de précipité.

Nous pouvons de suite conclure que les eaux aérées, celles des fleuves et des rivières, dans lesquelles le contact de l'air a facilité le dégagement d'une partie de cet acide carbonique libre, seront toujours moins impures que les eaux de puits.

Les eaux stagnantes, celles des marécages entre autres, qu'une exposition prolongée à l'air a pu débarrasser de la majeure partie de leurs sels métalliques, deviennent cependant d'un emploi dangereux par la forte proportion de matières organiques qu'elles renferment. En outre des désordres qu'elles provoquent dans les motenr par la formation des écumes, concentrées dans la chau-

Digitized by Google

dière à mesure de l'évaporation successive de l'eau, ces substances finissent par former un dépôt gélatineux qui reste en suspension, tuméfie la masse liquide et arrête l'ébullition.

Formation des dépôts. — Dès que la température de l'ébullition normale à l'air libre est atteinte tout l'acide carbonique en dissolution dans l'eau s'est dégagé : les carbonates de chaux et de magnésie sont précipités, restent en suspension dans l'eau et s'amassent sur les parois des générateurs de vapeur pendant le repos ; ils ne s'attachent pas aux parois métalliques après que celles-ci en ont été tapissées d'une très légère couche ; les carbonates forment donc un dépôt boueux, dont il est facile de se débarrasser par un lavage énergique des parois de la chaudière, si on a eu soin de ne la vider qu'après refroidissement complet. Si on vidait le générateur à chaud, les boues déposées sur les parois métalliques s'agglomèrent et adhèrent fortement aux parois.

Mais il est difficile d'obtenir des eaux ne contenant que des carbonates en suspension ; ceux-ci sont presque toujours accompagnés de sulfates de chaux et de magnésie, qui ne se précipitent qu'à une très haute température, au-dessus de 180° ; ils restent en dissolution, et lorsque celle-ci est arrrivée à son point de saturation ils se déposent sur les parois métalliques en cristallisant et y adhèrent fortement ; les carbonates se mélangent à ces dépôts de sulfates et le tout forme une croûte excessivement dure, qu'il faut attaquer à coups de marteau, et parfois de burin, pour la détacher de son support.

Les dépôts de sulfates par saturation se produisent bien avant que la totalité de la masse d'eau de la chaudière soit parvenue à son point de saturation : M. Daniel Stapfer a communiqué à la Société scientifique de Marseille les résultats d'expériences faites sur un générateur de ses ateliers. Après analyse de l'eau d'alimentation, il a calculé que le point de saturation ne pouvait être atteint pendant le fonctionnement hebdomadaire de son usine : il a vidangé complètement sa chaudière, toutes les semaines, pendant un an : la visite intérieure faite après cette période a montré que l'intérieur de l'appareil était complètement obstrué

Digitized by Google

par les dépôts et il a fallu détuber complètement le générateur pour retirer les sels de chaux qui formaient un seul bloc avec le faisceau tubulaire.

M. Stapfer en a conclu que l'eau n'était pas suffisamment en mouvement dans les générateurs pour qu'il y ait homogénéité dans le titre de la dissolution saline, et qu'il doit se produire des saturations locales qui permettent les incrustations, là surtout où la vaporisation est active.

Ces saturations locales à notre avis doivent être occasionnées et se produire exclusivement dans la couche qui est immédiatement en contact avec le métal : c'est la couche immobile dont nous avons parlé à la page 10, où la saturation se produit forcément puisque les bulles de vapeur y ont leur origine, et l'adhérence des cristaux au métal ne saurait être évitée. Les mouvements de la masse d'eau, et par suite la circulation, n'ont pas pour effet d'empêcher d'une manière directe la formation des incrustations, comme on le croit généralement bien à tort ; son seul effet est de permettre de recueillir en un endroit déterminé, une grande partie des corps en suspension, si le générateur est disposé pour que l'eau atteigne une grande vitesse sur les surfaces chauffées et une vitesse très faible dans une partie disposée *ad hoc*, où la décantation puisse s'opérer. La circulation n'est donc efficace au point de vue de la formation des dépôts, que parce qu'elle permet d'alimenter la couche immobile avec de l'eau déjà débarrassée d'une grande partie des sels en dissolution, en agissant ainsi comme retardateur de la saturation de cette couche de contact.

L'emploi des hautes pressions, 10 kilos et au delà, en permettant de précipiter les sulfates, combat avec succès la formation des dépôts adhérents, à la condition qu'ils soient entraînés loin des parois de coup de feu, et recueillis dans une partie non exposée à la chaleur, d'où l'on peut les extraire facilement à des intervalles rapprochés.

Parfois la composition chimique des eaux employées pour l'alimentation des chaudières attaque le métal, l'amincit, et met l'appareil hors de service en un temps très court.

Nous donnerons au dernier chapitre quelques indications sur

Digitized by Google

les procédés industriels employés pour combattre les effets des incrustations dans les générateurs de vapeur. Un moyen consiste à se servir pour l'alimentation, de la vapeur produite par la chaudière revenue à l'état liquide dans un condenseur par surface ; c'est une véritable distillation qui s'opère.

Emploi des eaux de condensation par surface. — Toutefois l'emploi des eaux de condensation par surface présente un inconvénient à cause des matières grasses, provenant de la lubréfaction des organes moteurs des machines, qui sont entraînées avec la vapeur et introduites dans les chaudières avec l'eau condensée. Nous reviendrons plus loin sur les inconvénients occasionnés par la présence des matières grasses dans les eaux d'alimentation et au dernier chapitre nous parlerons des procédés à employer pour les absorber avant l'introduction dans la chaudière.

C'est surtout dans la marine que l'emploi des eaux de condensation par surface à l'alimentation des chaudières a trouvé une application générale. Cela a permis de diminuer d'une façon considérable la formation des dépôts et d'atténuer la corrosion des tôles par l'acide chlorhydrique provenant de la décomposition du chlorure de magnésium contenu dans l'eau de mer, à la condition que l'étanchéité du condenseur soit satisfaisante ; en outre on réalise de ce chef une économie considérable de combustible, par la suppression des extractions fréquentes qu'on était obligé de faire pour que la solution saline dans le générateur ne dépassât pas un certain degré de concentration. Pour obtenir ce résultat il fallait extraire de la chaudière en une heure environ le tiers du volume d'eau d'alimentation : la perte du combustible de ce chef était donc très importante. L'extraction est encore utile avec les condenseurs à surface, car on est obligé d'ajouter un certain volume d'eau à celle donnée par la condensation pour compenser les pertes par les fuites, mais son importance est beaucoup moindre. Toutefois pour éviter les inconvénients des dépôts occasionnés par l'eau d'alimentation complémentaire, on fait presque toujours l'appoint par de l'eau, distillée dans un appareil auxiliaire appelé *bouilleur*.

Digitized by Google

Corrosion par l'eau distillée. — Lors des premières applications des condenseurs par surface, on a attribué à l'eau distillée une action corrosive. M. Jack (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1886) a constaté qu'avec l'eau distillée des condenseurs par surface il se produisait des corrosions surtout aux tôles de coup de feu, et que cette destruction était enrayée par l'addition d'eau de mer. Sur le chemin de fer *London and North Western*, l'eau relativement pure d'une région voisine de Manchester, produisait des corrosions analogues à celles observées sur les chaudières marines ou terrestres alimentées par l'eau de condensation par surface, et on y a remédié par l'addition de carbonate de chaux.

M. Scheurer-Kestner (*Bulletin de la Société de Mulhouse*, 1871) étudia la question, en plaçant dans des flacons parfaitement bouchés, contenant des eaux de diverses natures, une barre de fer plongeant dans l'eau de chaque flacon.

Dans l'eau non calcaire et bien aérée l'oxydation cesse dès que l'oxygène que l'eau tient en dissolution est consommé.

Dans de l'eau calcaire et bien aérée l'oxydation s'est produite plus tard que dans le premier cas et des conditions de l'expérience on peut conclure que la présence du calcaire rend l'oxydation plus lente.

Dans l'eau distillée récemment bouillie, aucun phénomène d'oxydation ne s'est manifesté.

On voit donc que dans les eaux pures et bien aérées l'oxydation doit être attribuée à l'oxygène de l'air dissout : la présence du calcaire retarde cette action et la rend beaucoup plus faible.

Les altérations du métal constatées dans les cas d'alimentation par l'eau de condensation par surface, ne doivent donc être attribuées qu'à l'action oxydante de l'air favorisée par les acides gras que ces eaux contiennent. Le filtrage de ces eaux s'impose donc comme une absolue nécessité, ainsi que l'emploi d'huiles minérales, à l'exclusion de toute matière lubréfiante animale ou végétale, dans les organes moteurs traversés par la vapeur, car celles-ci forment en outre avec les sels de chaux un savon calcaire, favorisant les écumes et les entraînements ; l'huile

Digitized by Google

minérale à son tour n'est pas exempte d'inconvénients, car on ne l'obtient pas toujours pure des marchands, et elle forme en outre avec les particules calcaires un aggloméré très dense, qui tombe au fond de l'eau sur les parois chauffées, et dont les effets sont désastreux sur les surfaces de coup de feu.

Digitized by Google

CHAPITRE III

SOULÈVEMENTS ET ENTRAINEMENTS D'EAU

Soulèvements de la masse d'eau. — Nous aurons l'occasion d'examiner dans le chapitre suivant l'influence des couches de dépôts sur les parois de coup de feu : elles amènent fatalement la surchauffe de ces parois tout comme la cloison de vapeur.

Mais la formation d'un matelas de vapeur sur une paroi de coup de feu est un phénomène d'une gravité exceptionnelle, car si à ce moment il survenait dans la chaudière, par une cause accidentelle quelconque, une rupture de l'état d'équilibre, le soulèvement de la masse d'eau totale de la chaudière se produirait inévitablement.

L'institut Franklin en Amérique a fait des essais sur les soulèvements d'eau dans les générateurs de vapeur : dans l'une des expériences, une chaudière en tôle de fer était munie de regards en verre : après avoir atteint la pression de deux astmosphères, on ouvrait brusquement un orifice de très petite section placé sur la partie occupée par l'espace de vapeur ; toute l'eau était lancée contre les parois supérieures, et elle s'écoulait avec violence par l'orifice qui n'aurait dû donner passage qu'à la vapeur.

La puissance de la force répulsive qu'exerce une paroi métallique surchauffée sur la masse d'eau lorsqu'une cloison de vapeur s'établit, peut atteindre une valeur considérable, ainsi que nous allons le voir.

Expérience de Perkins. — L'expérience suivante, que le hasard

Digitized by Google

fit réaliser à M. Perkins, est relatée par Péclet (*Traité de la chaleur*, vol. II).

« Un générateur de vapeur en bronze étant fendu (au foyer) sur une partie de sa longueur, rien ne sortait par la fente à une haute température ; mais il se produisait un jet d'eau lorsque la température était peu supérieure à 100°. On pouvait supposer que l'absence du jet à une haute température provenait de la dilatation du métal qui se trouvait de chaque côté de la fente ; mais en perçant le générateur d'un trou de 1/8 de pouce de diamètre, et en y adaptant un canon de fusil de trois pieds de longueur, terminé par un robinet, on a reconnu que le robinet ne donnait point d'eau lorsque la pression était de cinquante atmosphères, et que sous une pression beaucoup plus faible, l'eau en sortait avec une grande vitesse. »

Observations de M. Farcot. — M. Farcot, dans une communication à la société des Ingénieurs Civils en 1867, relate l'observation faite dans une forge de la Haute Silésie, où par l'emploi d'eaux d'alimentation grasses, des troubles profonds furent constatés dans les générateurs de vapeur : on constatait par intervalles un soulèvement complet du corps de chaudière de 50 millimètres, des bruits sourds se produisaient par moment, suivis d'une détonation et d'un soubresaut violent. On modifia la qualité des eaux d'alimentation et les phénomènes ne se produisirent plus.

Fuites au foyer. — Dans la pratique on constate souvent, qu'une gerçure à une tôle de coup de feu donnant lieu à une fuite d'eau au repos où pendant la mise en pression, ne laisse plus passer l'eau dès que la pression à l'intérieur de la chaudière atteint une certaine valeur et que l'allure du feu est assez vive. On donne de ce fait une explication erronée en disant que l'eau qui s'échappe par la gerçure est vaporisée instantanément et n'est pas visible à l'œil à cause de la haute température du foyer : les fuites sont visibles et apparentes lorsque les fentes sont assez grandes pour que les phénomènes capillaires ne puissent plus se produire. Mais d'une façon générale les fuites aux parois

Digitized by Google

de coup de feu se manifestent avant la mise en pression et à l'arrêt.

En réalité ni eau, ni vapeur ne s'écoulent de la fente, lorsque le métal est à très haute température, car en vertu des lois de la capillarité, le ménisque de l'eau devient convexe et la tension superficielle suffit à faire équilibre à la pression.

Expérience de Bourne. — M. John Bourne (*a Treatise on the Steam-Engine*, Londres 1861) relate l'expérience suivante :

« Il ne saurait y avoir de doute sur la répulsion qui s'exerce parfois entre l'eau et le métal. L'eau paraît n'être ainsi repoussée que dans les parties du fond des chaudières exposées à l'action directe du foyer. Dans certaines chaudières l'on peut à volonté porter les tôles de coup de feu au rouge en poussant les feux, et dans beaucoup de chaudières fixes, les surfaces des foyers seront plus ou moins endommagées par une allure vive de la combustion.

« Si l'on prend une petite chaudière cylindrique verticale, chauffée par le bas, sur laquelle on place un certain nombre de robinets de jauge, l'un près du sommet, l'autre près du fond chauffé et les restants dans des positions intermédiaires, en réglant l'alimentation de façon à ce que l'eau s'écoule par le robinet de jauge inférieur, l'écoulement se continuera tant que l'allure du feu sera modérée.

« Mais aussitôt qu'on pousse le feu, de façon à chauffer fortement le fond, l'eau cessera de couler par le robinet de jauge près du fond chauffé, et s'écoulera au contraire par le robinet placé tout en haut de la chaudière, et ce pendant tout le temps que l'allure vive du feu est maintenue ; ce qui démontre que la chaleur transmise au fond a soulevé l'eau jusqu'à ce qu'elle occupât la partie haute du générateur au lieu de la partie basse. ».

Observations de M. Dubiau. — M. Dubiau, directeur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Sud-Est, a été à Marseille témoin d'un soulèvement d'eau par rupture d'équilibre, dans un essai sur les chaudières multitubulaires Babcock et Wilcox, installées à l'usine électrique de M. Gillibert.

Digitized by Google

Le manomètre accusait 7 kilos de pression, l'indicateur de niveau était à la hauteur normale. Le verre de cet indicateur ayant cassé, le chauffeur après avoir fermé le robinet inférieur, ferme d'un coup de pelle le robinet supérieur. Immédiatement une détonation se produisit, suivie d'un sifflement strident et l'on crut à la projection d'un tampon de fermeture à l'arrière par rupture du boulon de serrage. En revenant après quelques instants dans la chaufferie, on la trouva inondée, la chaudière à moitié vidée, le manomètre n'accusant que 4 kilos de pression. Un témoin qui se trouvait sur la passerelle au-dessus des chaudières, put observer qu'au moment de la détonation une gerbe d'eau et de vapeur s'était élancée d'une soupape de sûreté ; celles-ci, vérifiées, furent trouvées régulièrement appliquées sur leurs sièges. Nous expliquons ce phénomène en remarquant que la fermeture brusque du robinet de niveau a produit un coup de bélier dans l'espace de vapeur du réservoir cylindrique de la chaudière, et a été suffisant pour faire soulever brusquement la soupape chargée à 7,5 kilogrammes alors que la pression au manomètre n'était que de 7 kilogrammes. L'ouverture brusque de la soupape a produit une dépression et le soulèvement immédiat de toute la masse d'eau de la chaudière, malgré une disposition spéciale adoptée par le constructeur dans cette installation, et qui consistait à faire déboucher la vapeur dans le réservoir au-dessus du niveau de l'eau, dans l'espace de vapeur.

Soulèvements dans une chaudière semi-tubulaire. — A la blanchisserie de M. de Saint-Léger à Boulogne-sur-Seine une chaudière semi-tubulaire de 140 mètres carrés de surface de chauffe timbrée à 7 kilos était employée pour le service de l'usine, et alimentait en outre des séchoirs à vapeur, placés à l'étage supérieur. La pression du service normal ne dépassait pas 4 kilos, mais chaque fois que par surcroît de travail, on augmentait la pression de fonctionnement, dès que celle-ci atteignait 6 kilos 1/2 les séchoirs ne recevaient plus que de l'eau, et celle-ci disparaissait dans les indicateurs de niveau. Le matelas de vapeur et le soulèvement de la masse d'eau se produisaient dans cet appareil dès que l'on poussait les feux et que l'on voulait atteindre la

Digitized by Google

pression normale pour laquelle la chaudière était établie. L'installation d'une deuxième chaudière de même puissance, la marche à feu bas et à la pression de 4 kilos, a seule apporté remède à cet état de choses.

Analogie des soulèvements avec le phénomène des Geysers. — Dès que dans une chaudière il y a soulèvement d'eau par le matelas de vapeur, les couches du fond passent à une pression inférieure, d'autant plus brusquement que les sections des lames d'eau sont plus faibles et la surface libre plus grande. Le phénomène des Geysers (p. 25) se produit, et vient accroître l'impulsion donnée à la masse d'eau en mouvement, une partie de la chaleur latente de vaporisation se transformant en énergie dynamique.

Pour éviter l'accès aux conduites de l'eau ainsi lancée dans l'espace de vapeur, il est nécessaire de ne pas placer les robinets de prises de vapeur directement au-dessus des surfaces de coup de feu, ni des débouchés de l'eau ou de la vapeur dans les réservoirs, et de masquer leur ouverture par des artifices quelconques.

Distinction entre les soulèvements et les entraînements d'eau. — Ce phénomène des soulèvements est absolument distinct de celui des entraînements d'eau que nous allons étudier : il se caractérise par des paquets volumineux de liquide projetés avec violence et qui peuvent occasionner des désordres très graves à la chaudière et aux machines motrices, si la disposition défectueuse des prises de vapeur permet le passage de ces paquets dans les conduites. Il ne se produit qu'accidentellement, et peut être favorisé par la disposition adoptée dans la construction de certains générateurs. Le phénomène des entraînements se produit au contraire d'une façon presque permanente et n'a que de faibles inconvénients lorsque la vapeur doit être employée au chauffage : si elle est employée à actionner des machines, il occasionne une perte considérable de combustible et peut amener de graves désordres dans les moteurs : mais il n'affecte nullement l'appareil générateur.

Digitized by Google

Entraînements. — Cette eau entraînée mécaniquement avec la vapeur provient des enveloppes des bulles qui viennent crever à la surface du liquide : en faisant bouillir de l'eau dans un récipient, on voit de nombreuses et très petites gouttelettes liquides jaillir de la surface libre : leur nombre qui est considérable lorsque les bulles de vapeur sont petites, diminue avec une augmentation du volume de celles-ci. Ces particules ainsi lancées dans l'atmosphère gazeuse sont entraînées par le courant dans les tuyaux, où leur présence est constatée par la couche des dépôts calcaires qui se forme sur les parois des conduites de vapeur. Les dépôts sont ainsi amenés parfois jusque dans les organes moteurs des machines et rayent les glaces des tiroirs de distribution et les parois des cylindres.

Si l'on examine l'intérieur des corps cylindriques des chaudières, dans lesquels la vapeur débouche par des communications en dessous du plan du niveau d'eau, on constate des agglomérations de dépôts sur la paroi de l'espace de vapeur opposée aux débouchés de celle-ci, et qui s'y attachent, charriés par les molécules d'eau qui y sont projetées par les bulles qui viennent crever à la surface du liquide.

Quantité d'eau entraînée. — La quantité d'eau ainsi entraînée varie suivant le type de générateur, et atteint parfois des proportions considérables.

D'après les expériences faites par M. de Pambour la quantité d'eau entraînée, dans les locomotives sur lesquelles il a opéré, varie de 30 à 40 p. 100 du poids de la vapeur. Sur le chemin de fer du Nord M. Bertera a trouvé en moyenne 42 p. 100 sur les machines à voyageurs et 52 p. 100 sur les machines à marchandises. Ces expériences ont été faites en mesurant l'eau vaporisée en un temps donné et en comparant ce poids à celui de la vapeur admise dans les cylindres pendant ce temps. Ils comprennent les fuites et les condensations sur les différents parcours de la vapeur se rendant de la chaudière aux cylindres.

Il est en général admis d'après les observations de la pratique, que la vapeur à basse pression entraîne une quantité d'eau plus considérable que la vapeur à haute pression : la valeur de la

Digitized by Google

pression capillaire de l'eau diminuant avec la température suffit à expliquer théoriquement cette différence. Il est facile de constater que l'entraînement n'est dû qu'à la déchirure de la pellicule liquide qui enserre la bulle de vapeur, en injectant à la surface de l'eau en ébullition une très faible quantité d'huile qui supprime les entraînements par diminution de la valeur de la tension superficielle ; mais l'injection d'huile, permise dans certains cas par les règlements de quelques marines, n'est un remède à employer que par exception, car elle se combine ou se mélange avec les sels calcaires en formant un savon ou un agglomeré de chaux qui se précipite et s'attache aux parois des générateurs, et inévitablement occasionne des coups de feu.

Remarques de M. Stromeyer. — M. Stromeyer (*Marine Boiler Management and Construction.* Londres, 1893) dit au sujet des entraînements :

« Les notions sur ce qui se passe à l'intérieur d'une chaudière sont des plus vagues, et il est intéressant de porter son attention sur les points suivants :

« Prenons par exemple une chaudière (marine) de $4^{m},570$ de diamètre et $3^{m},350$ de long. L'espace de vapeur aura environ $1^{m},220$ de hauteur et $12^{m.c.}$, 745 de capacité. La chaudière pourra vaporiser à tirage naturel, environ 4 536 kilogrammes d'eau à l'heure, et le double de cette quantité à tirage forcé. La surface du plan de niveau d'eau sera de 13 mètres carrés 93 environ, de sorte qu'à tirage forcé chaque décimètre carré de cette surface doit émettre $6^{kg},585$ de vapeur à l'heure, ou $0^{kg},00183$ par seconde. A la pression de $12^{kg},750$ par centimètre carré, ce poids de vapeur occupe en volume 2 dm cubes 360. A la pression atmosphérique le volume occupé serait dix fois plus grand, mais ce volume réduit correspond encore à deux bulles d'environ 10 millimètres de diamètre par centimètre carré de surface et par seconde, ou 800 par seconde, si nous ne leur supposons que $2^{mm},5$ de diamètre. Il est hors de doute si l'eau contient des traces de matières grasses ou agglutinantes, que ces bulles ne soient happées par le courant de vapeur et ne déchirent leur enveloppe que dans les conduites de vapeur surtout si l'on considère que le

Digitized by Google

volume de vapeur de l'espace libre est renouvelé en 40 secondes.

« Il est un fait bien connu : c'est l'impossibilité de souffler des bulles de savon dans une atmosphère électrisée : il est fort surprenant qu'on n'ait pas essayé de tirer profit de cet enseignement à l'époque où les basses pressions étaient en faveur. »

M. Stromeyer suppose dans les calculs qui précèdent que *toute* la vapeur se dégage sous forme de bulles : il ne tient pas compte de la production de la surface libre.

Vaporisations apparentes et réelles. — Il y a donc dans les générateurs de vapeur une vaporisation apparente d'un volume d'eau déterminé, et la vaporisation réelle d'une partie de ce volume. Il est inutile d'insister sur la nécessité de supprimer ou de diminuer la valeur de ces entraînements, et sur le moyen de les mesurer avec précision si l'on veut constater le rendement des chaudières et des machines. Les puissances de vaporisation et les hauts rendements attribués à certains types de générateurs, ne s'expliquent que par l'usage des chiffres correspondant à la vaporisation apparente et non à la vaporisation réelle.

Dispositifs employés pour atténuer les effets des entraînements. — Plusieurs moyens ont été proposés et essayés pour débarrasser la vapeur de l'eau liquide qu'elle véhicule : nous allons examiner les principaux.

On place l'orifice par lequel la vapeur s'écoule sur un tuyau de même diamètre, disposé horizontalement dans la chaudière, occupant toute la longueur du générateur, prenant la vapeur à une extrémité où l'ébullition est supposée moins tumultueuse et la laissant sortir à l'autre extrémité : on pensait ainsi produire une réévaporation d'une partie de l'eau entraînée. On a ensuite fermé ce tuyau à ses extrémités, et on l'a percé de nombreux petits orifices sur la partie supérieure pour le raccorder sur une partie de sa longueur à l'orifice d'écoulement. Par ce dispositif la prise de vapeur se répartit sur une grande surface et la vitesse du fluide est considérablement réduite. Cet appareil donne une amélioration, mais permet encore les entraînements dans des proportions considérables.

Digitized by Google

On a alors imaginé des appareils placés sur les conduites de vapeur, agissant mécaniquement, la vapeur frappant contre des chicanes qu'elle est obligée de contourner, l'eau entraînée se déposant contre les parois métalliques et coulant le long de celles-ci pour se recueillir dans les parties basses des séparateurs d'où elle est renvoyée à la chaudière. Une ou plusieurs toiles métalliques intercalées dans un récipient *ad hoc* remplissent également bien le même but, mais ces appareils en empêchant l'arrivée de l'eau dans les machines motrices, ne suppriment que les troubles qu'elle peut y occasionner : elles n'empêchent pas les

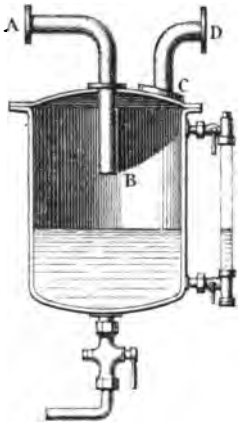


Fig. 21.

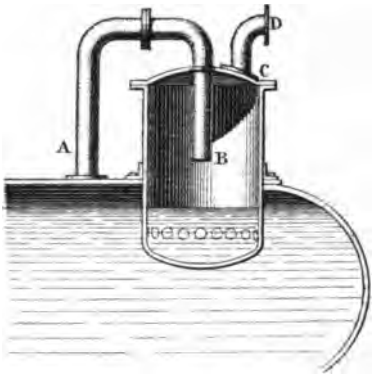


Fig. 22.

entraînements et la perte de combustible qui en est la conséquence, malgré la réintroduction dans le générateur des eaux recueillies.

Une disposition assez efficace consiste (fig. 21) en un vase de fonte, de tôle ou de cuivre, renfermant de l'eau jusqu'à une certaine hauteur, dans lequel la vapeur est amenée par un tuyau A B, qui se prolonge verticalement dans le vase jusqu'à 20 ou 30 centimètres du niveau de l'eau, et d'où elle sort ensuite par un tuyau C D qui s'ouvre sur le couvercle. Les globules d'eau renfermés dans la vapeur sont supposés se précipiter dans l'eau du vase et y rester, tandis que la vapeur s'échappe presque sèche. Un niveau d'eau fait connaître au chauffeur la hauteur du liquide dans le vase, et un tube qui retourne à la chaudière permet de n'y laisser que la quantité convenable.

Digitized by Google

On a cru rendre l'appareil plus simple et diminuer la perte par refroidissement en plaçant le récipient en partie dans la chaudière, comme l'indique la figure 22, et en perçant la partie inférieure du vase d'un certain nombre d'orifices, pour que le niveau de l'eau dans le séparateur se maintint le même que dans la chaudière : placé dans ces conditions l'appareil a été loin de répondre à son but, et perdait toute son efficacité.

Propriété des parois froides. — La propriété des parois froides, dont ce type de séparateur est une application, nous fournit l'ex-

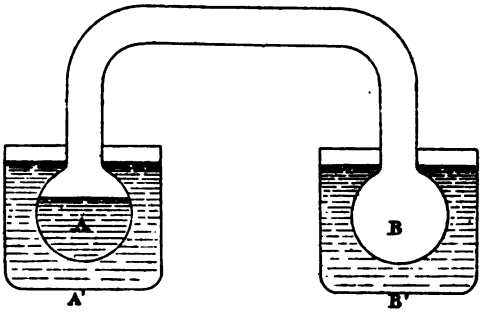


Fig. 23.

plication de cette anomalie : pour condenser une partie de la vapeur saturée occupant un espace, il n'est pas nécessaire de refroidir celui-ci en entier : il suffit d'abaisser la température d'une partie de ses parois. Si l'on a introduit de l'eau (fig. 23) dans un tube en verre recourbé, terminé à chacune de ses extrémités par deux sphères, et qu'on plonge la sphère où l'on fait passer le liquide dans un récipient A' contenant de l'eau à une température plus élevée que celle d'un deuxième récipient B' où l'on fait plonger la sphère vide, la vapeur d'eau contenue en B se condensera, puisqu'elle ne peut exister dans ce milieu qu'avec la force élastique qui correspond à la température de B'.Cette condensation amène une diminution de la force élastique dans tout l'espace occupé par la vapeur, et une partie du liquide en A se vaporise : la même succession de phénomènes se reproduit et il y a distillation continue de A vers B.

Dans le séparateur de la figure 21, les parois du récipient émet-

Digitized by Google

tent de la chaleur qu'elles prennent aux couches de vapeur avec lesquelles elles sont en contact : il y a condensation partielle de la vapeur le long de ces parois et vaporisation d'une plus ou moins grande partie des molécules d'eau liquide entraînées par la vapeur, suivant le volume du récipient. La disposition de la figure 22 ne permet pas à ces phénomènes de s'accomplir, car la chaleur émise par les parois est empruntée à la chaudière elle-même et à la masse d'eau qu'elle contient : de là son inefficacité. Il suffit de revêtir de matière isolante un réservoir de séparation établi dans les conditions de la figure 21 pour le rendre beaucoup moins efficace.

Détendeurs par étranglement. — La détente de la vapeur, par le rétrécissement de l'orifice de sortie, a été proposée pour supprimer les effets des entraînements d'eau. Elle a été couramment employée depuis que les générateurs à tubes d'eau ont permis l'usage industriel de pressions élevées.

Mais pour que ce moyen puisse être employé avec succès, il faudrait connaître à priori exactement le volume d'eau entraîné mécaniquement pour déterminer la chute de pression, qui doit être d'autant plus considérable que la pression du fonctionnement normal est plus élevée : on ne détend guère en général la vapeur à la sortie de la chaudière que de 2 à 3 kilos : quelques constructeurs seulement ont poussé la détente jusqu'à 5 kilos de chute de pression ; cela est inefficace.

Si nous supposons que la force élastique de la vapeur dans un générateur soit d'environ 16 kilos 1/4, correspondant à une température de 205°, la chaleur totale de vaporisation nous est donnée par la relation :

$$606{,}5 + 0{,}305\ t = 669^\circ$$

En détendant à la force élastique qui correspond à la température de 185° (un peu plus de 10 kilos de pression effective), la chaleur totale de vaporisation correspondant à cette température sera de :

$$606{,}5 + 0{,}305\ t' = 660^\circ$$

Par cette chute de pression un kilogramme de vapeur ne libérera que 9 calories.

Digitized by Google

La valeur de l'entraînement d'eau liquide étant exceptionnellement inférieure à 25 p. 100 du poids de la vapeur, pour que ces 250 grammes d'eau se vaporisent ils doivent absorber 165 calories. Or à la température de la chaudière, ils possèdent 51 calories 25, le kilogramme de vapeur détendue n'en a pu libérer que 9, soit 60 calories 25. Sur les 250 grammes d'eau entraînée, il n'y a qu'un peu moins de 30 grammes qui puissent être transformés en vapeur.

Surchauffe de la vapeur. — La surchauffe de la vapeur par son passage dans un serpentin chauffé par les gaz de la combustion est un moyen plus efficace. Les économies que l'on peut réaliser dans le fonctionnement des moteurs à vapeur, alimentés par des générateurs munis d'appareils de surchauffe, sont dues à deux causes distinctes : l'élévation de température de la vapeur au-dessus de celle qui correspond à sa force élastique maxima et l'évaporation d'une partie de l'eau entraînée. De ces deux causes la première n'agit que pendant la période de détente de la vapeur, en fournissant à celle-ci l'appoint de sa chaleur latente de vaporisation qui croît avec la diminution de la force élastique, appoint qui, dans le cas de vapeur non surchauffée, se fait aux dépens d'une partie des molécules de vapeur qui retournent à l'état liquide : elle produit une économie de combustible, qui, dans les conditions les plus favorables, peut s'approcher du pourcentage de l'économie de vapeur.

L'évaporation de l'eau entraînée produit au contraire une économie directe de combustible, même si la température de la vapeur ne dépasse pas celle de la pression de fonctionnement.

On reconnaît donc qu'un surchauffeur combat efficacement les entraînements d'eau si les économies réalisées sur le combustible brûlé sont supérieures à celles réalisées sur la consommation de vapeur.

Le graissage des organes moteurs traversés par la vapeur devient moins aisé avec de la vapeur surchauffée, et exige des dispositifs spéciaux, des soins assidus, et l'emploi d'huiles minérales de toute première qualité.

Le dispositif communément employé pour surchauffer la vapeur

Digitized by Google

consiste à lui faire traverser un serpentin léché par les gaz de la combustion ; mais pour que les tubes surchauffeurs répondent à leur but, ils doivent être placés au contact de gaz à température élevée ; ils se détériorent alors avec rapidité et leur emploi n'est pas sans danger surtout dans les générateurs à allure vive du foyer ; en outre, les particules d'eau liquide entraînées sont repoussées, par l'excès de température des parois des tubes, vers le centre de la veine fluide et le but poursuivi n'est qu'imparfaitement atteint.

Une disposition rationnelle de surchauffeur est celle adoptée par M. Schwoerer, et les résultats obtenus paraissent satisfaisants. Cet appareil se compose essentiellement d'un tube en fonte avec ailettes, longitudinales à l'intérieur, transversales à l'extérieur, chauffé au besoin par un deuxième foyer. Les surfaces de chauffe pénètrent ainsi dans le sein de la veine fluide, et leur action est efficace. On constate en effet qu'à l'encontre des autres types de surchauffeurs de vapeur, l'appareil de M. Schwoerer réalise une économie de charbon plus grande que l'économie de vapeur, par le fait de cette évaporation effective d'une partie de l'eau entraînée ; il transmet à conditions égales, une plus grande quantité de chaleur à la veine fluide que les autres dispositifs et se détériore moins rapidement.

Périodes d'entraînement. — Sur une même chaudière, en fonctionnement normal, les entraînements d'eau se produisent en plus grande abondance lorsque la pression tend à baisser, et diminuent pendant la période d'accroissement de la pression ; c'est une conséquence des variations de la valeur de la pression capillaire en fonction des températures.

En plaçant au fond d'un verre à expérience quelques petits cristaux d'acide citrique et en y versant une solution d'un carbonate alcalin, on constatera cette influence : la valeur de la tension superficielle de l'eau à basse température produit un véritable nuage qui se forme à la partie supérieure du verre.

On explique ainsi pourquoi, lors de la mise en mouvement des machines, la proportion d'eau liquide entraînée est toujours plus considérable que pendant le fonctionnement normal.

Digitized by Google

Veines d'entraînements. — Dans les conduites de vapeur convenablement isolées une partie de l'eau entraînée tombe par gravité à la partie inférieure des tuyaux et y chemine : mais si les conduites ne sont pas recouvertes de substances mauvaises conductrices de la chaleur, à cause de leur pouvoir émissif elles fonctionnent avec la propriété des parois froides ; la vapeur des couches de contact se condense, et l'eau des veines centrales se vaporise. Il est donc de la plus haute importance lorsqu'il s'agit de mesurer le degré de siccité de la vapeur, de prélever des échantillons donnant la composition exacte du fluide à examiner.

Choix de la prise. — La position de la prise est d'un choix des plus délicats et de nature à fausser complètement les résultats des opérations. D'habitude on dispose la prise sous forme d'un tuyau courbé de petit diamètre, pénétrant au centre de la conduite, l'ouverture dirigée vers l'arrivée de la vapeur ; les échantillons ainsi prélevés ne donnent que la composition de la veine centrale et si l'opérateur les prélève sans tenir compte des périodes d'entraînement, il conclura fatalement à un chiffre très bas pour des appareils où la proportion d'eau entraînée est au contraire fort élevée. C'est ainsi que l'on voit parfois des procès-verbaux d'essais accuser des vaporisations supérieures à la puissance d'évaporation théorique du combustible employé.

L'on dispose parfois la prise sous forme d'un entonnoir étoilé ; cette disposition, meilleure que la prise unique centrale, ne saurait donner de résultats exacts, car l'influence de la veine centrale est prépondérante et celle des veines de la périphérie, les plus importantes, nulle. On peut atténuer ces inconvénients en plaçant la prise d'essai ainsi disposée immédiatement après le robinet de prise de vapeur sur la chaudière ; les résultats accusés dans ce cas, sans être les vrais, indiquent toujours des entraînements beaucoup plus considérables.

Mesure des entraînements. — Lorsqu'on doit procéder à un essai de rendement sur un générateur de vapeur, il est indispensable de s'assurer de l'étanchéité parfaite de l'appareil et de toute la robinetterie placée en dessous du plan de niveau d'eau : sauf

Digitized by Google

un seul tuyau d'alimentation, toute tuyauterie autre que de vapeur doit être défaite, et des joints pleins ou des bouchons placés sur les différents robinets.

Deux méthodes sont généralement employées pour la mesure du rapport entre la vaporisation apparente et la vaporisation réelle des générateurs de vapeur; la méthode du sel et la méthode calorimétrique.

Toutes deux telles qu'on les pratique sont sujettes à des erreurs dans leurs applications, indépendamment des causes d'erreur provenant de la position de la prise d'essai et du moment choisi pour l'observation.

Méthode du sel. — La méthode du sel est d'une application facile ; on introduit dans le générateur 2 à 3 kilogrammes de chlorure de sodium par 100 litres d'eau contenus dans l'appareil, et pendant la durée de l'expérience on prélève par la prise d'essai des échantillons de vapeur qu'on fait condenser dans un serpentin, et des échantillons d'eau par un robinet de purge. L'analyse chimique par une liqueur titrée de nitrate d'argent, donne la proportion de sel contenu dans l'eau du générateur et dans la vapeur condensée ; le rapport entre les deux résultats de l'analyse indique la quantité d'eau entraînée par la vapeur, car celle-ci ne pouvant transporter le sel, l'eau seule peut lui servir de véhicule.

Critique de la méthode du sel. — Cette méthode donne pour la proportion du sel contenu dans l'eau de la chaudière un résultat qu'il faut corriger ; à cause de l'évaporation de l'eau chaude extraite, il y a lieu d'ajouter par le calcul au volume sur lequel on a opéré, le volume du liquide qui s'est évaporé. On suppose l'eau à la température de la vapeur, et on fait la correction. Cette correction fausse toujours les résultats, car la température de l'eau prise pour échantillon peut être de beaucoup inférieure à celle de la vapeur, et si elle est à la température de la vapeur elle peut avoir absorbé une partie plus ou moins considérable de sa chaleur latente de vaporisation. Pour se mettre à l'abri de cette cause d'erreur il suffirait de faire passer l'eau échantillon dans un serpentin plongé dans l'eau froide.

Digitized by Google

D'un autre côté la proportion de sel qui peut être considérée comme uniforme dans toute la masse liquide au début des opérations, ne l'est plus après un certain temps : l'analyse de différents échantillons prélevés simultanément sur différentes parties de la chaudière accuse des différences importantes dans le degré de la solution saline.

Méthode du calorimètre. — La méthode calorimétrique repose sur le principe suivant : un kilogramme de vapeur sèche, à une pression déterminée, libère en revenant à l'état liquide un nombre de calories égal à la différence entre sa chaleur totale de vaporisation et la chaleur spécifique à sa température à l'état liquide ; tandis que chaque kilogramme d'eau en suspension dans la vapeur ne libère par un abaissement de température que le nombre de calories correspondant à l'écart des températures.

Si dans un volume d'eau déterminé, à une température donnée, nous faisons condenser P_v kilogrammes de vapeur la qualité de cette vapeur sera accusée par la température finale du mélange. L'équation de la vapeur saturée, sans trace d'eau est donc pour ce cas :

$$(P + P_v)\, t' = Pt + (606{,}5 + 0{,}305\ T)\ P_v$$

d'où l'on tire

$$t' = \frac{Pt + (606{,}5 + 0{,}305\ T)\ P_v}{P + P_v}$$

P = poids de l'eau de condensation en kilogrammes ;
t = température initiale de l'eau de condensation ;
t' = température finale théorique de l'eau de condensation ;
T = température de la vapeur saturée à la pression de la chaudière.

Si le kilogramme de vapeur condensée contient une quantité p d'eau entraînée, la température finale réelle du volume d'eau $P + P_v$ sera inférieure à t' d'une quantité d, correspondant à la quantité de chaleur latente de vaporisation qui n'existe pas dans le poids d'eau entraîné,

$$d\ (P + P_v) = p\ (606{,}5 - 0{,}695\ T)\ P_v$$

d'où

$$p = \frac{d\ (P + P_v)}{(606{,}5 - 0{,}695\ T)\ P}$$

Digitized by Google

Si la valeur de la température finale réelle était supérieure à la vapeur calculée pour t', la vapeur serait surchauffée.

Un calorimètre doit se composer essentiellement d'un récipient étanche, établi en matière non poreuse et mauvaise conductrice de la chaleur, d'une contenance d'au moins 100 litres, monté sur bascule sensible au gramme, muni d'un couvercle dans lequel on fait plonger un tube en caoutchouc durci débouchant dans le fond.

Un thermomètre étalonné très exactement donnant les températures au dixième de degré, et un manomètre très sensible, vérifié récemment, exact à 100 grammes près, servent à déterminer celui-ci la température de la vapeur à la pression de la chaudière, le premier les températures de l'eau de condensation au début et à la fin de l'opération.

Les poids de la bascule doivent être rigoureusement vérifiés et tarés. Dans ces conditions, si l'observation est conduite avec célérité, qu'on ne commette pas d'erreur de lecture aux thermomètres ni au manomètre, que la disposition prise pour la distribution de la vapeur dans l'eau de condensation permette l'échauffement uniforme de toute la masse, que la prise soit disposée pour donner l'échantillon moyen de la qualité de la vapeur, les résultats de l'observation peuvent être considérés exacts à 2 p. 100 près.

On voit tout le parti qu'un opérateur habile peut tirer de l'emploi du calorimètre à la mesure des vaporisations apparentes et réelles, en choisissant judicieusement l'endroit de la prise d'essai et le moment propice à l'observation.

Méthode de la condensation totale. — Le seul moyen suffisamment exact pour mesurer les entraînements d'eau des générateurs de vapeur c'est la méthode du sel à prises multiples combinée avec la condensation par surface de toute la production de la chaudière et le titrage des eaux de condensation ; elle n'est malheureusement pas d'application facile là où il n'existe pas de condenseur par surface rigoureusement étanche attelé aux machines motrices. Dans tous les essais pratiqués dans ces conditions la quantité d'eau entraînée à l'état liquide n'a jamais été trouvée inférieure à 20 p. 100 du poids de la vapeur.

Plusieurs prix sont offerts aux chercheurs par les sociétés

Digitized by Google

savantes d'Europe et d'Amérique, que la question du dosage certain des entraînements d'eau préoccupe, pour la découverte d'une méthode facile, à l'abri des critiques et des causes d'erreur, pouvant s'appliquer industriellement à tous les cas.

Les effets nuisibles des entraînements d'eau sur les moteurs à vapeur sont nombreux et graves.

En sus de la perte très importante de combustible qu'ils occasionnent, la plus grande partie des désordres qui se manifestent dans les moteurs horizontaux n'ayant pas les orifices d'échappement placés à la partie basse des cylindres, et dans les moteurs verticaux, sont produits par l'accumulation de l'eau à fond de course : la suppression des entraînements d'eau des chaudières en réalisant de notables économies de combustible, fera disparaître en même temps la plupart des misères et des tracas actuels du constructeur de machines.

Alimentation dans la vapeur. Ses avantages. — L'introduction des eaux d'alimentation dans l'espace de vapeur a été pendant longtemps sévèrement condamnée. Peu d'ingénieurs ont osé braver le préjugé : les quelques essais faits timidement de-ci de là ont donné des résultats tellement satisfaisants qu'un revirement profond s'opère en ce moment en faveur de l'alimentation dans la vapeur.

Nous avons personnellement toujours placé l'alimentation dans la vapeur et nous avons reconnu que c'était un moyen très efficace de diminuer le poids d'eau entraîné, en proportion d'autant plus considérable que la température de l'eau d'alimentation est plus basse et que la pression de fonctionnement du générateur est plus élevée.

Il suffit de se reporter à la théorie des parois froides, pour voir immédiatement que l'injection d'eau dans l'espace de vapeur amène une condensation immédiate dans la zone de contact, et que dans le voisinage de cette zone les particules d'eau en suspension se vaporisent par suite de la dépression qui se produit à l'endroit de l'introduction de l'eau : plus la température de l'alimentation sera basse, plus grande sera la dépression et plus étendue la zone d'évaporation des globules liquides en suspension.

Digitized by Google

En outre l'échauffement rapide de l'eau d'alimentation facilite la précipitation des sels calcaires en dissolution et les empêche de se loger dans les parties basses des générateurs, ce qui est une source de désordres très graves dans les chaudières à foyers extérieurs et que nous aurons l'occasion d'étudier complètement au chapitre v. Il faut toutefois, lorsqu'on alimente dans la vapeur, rejeter l'emploi de tubes divisant l'eau en un grand nombre de petits jets, auxquels on serait conduit par les considérations qui précèdent, et se borner à des tuyaux à pleine ouverture. En effet, dans les premiers il se produit à cause de la condensation de la vapeur, un refoulement de la veine liquide, et des coups de bélier, qui déforment rapidement le tube à sa base (fig. 24).

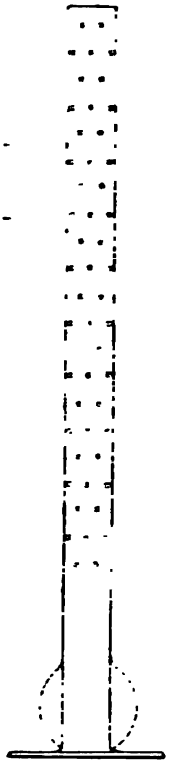


Fig. 24.

Lorsqu'on alimente dans la vapeur avec une pompe et de l'eau à basse température, le vide momentané qui se produit par la brusque condensation de la vapeur sur le passage du paquet d'eau, fait que celui-ci tombe sur la masse liquide de la chaudière en produisant un bruit de marteau d'eau, plus ou moins considérable, et qui a été la cause principale de proscription de ce dispositif d'alimentation.

Il suffit, pour le supprimer, de placer dans l'espace de vapeur un récipient dans lequel on fait plonger le tuyau d'alimentation. L'eau qui déborde et ruisselle le long des parois de ce récipient, ne produit plus de bruit perceptible en tombant.

Digitized by Google

CHAPITRE IV

TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Généralités sur la chaleur. — La *théorie dynamique ou mécanique de la chaleur* dont Tyndall a été le grand vulgarisateur[1], enseigne que la transmission de la chaleur entre deux corps d'inégale température n'est qu'un transport d'énergie, en perte pour le corps le plus chaud et en accroissement équivalent pour le corps le moins chaud.

L'absorption ou la perte par un corps d'une quantité quelconque d'énergie, se traduit en un accroissement ou une diminution des vibrations moléculaires de ce corps, et il y a transport d'énergie tant que les mouvements moléculaires de deux corps ne sont pas en équilibre.

Lorsque la chaleur se transmet dans la masse même d'un corps, ce mode de transmission s'appelle *par conductibilité*. Si le transport d'énergie se fait d'un corps à un autre, on dit que la transmission a lieu *par contact* si les corps sont à leur limite de rapprochement, et *par rayonnement* si les corps sont séparés par une distance sensible. Enfin on dit que la transmission a lieu *par convection* lorsqu'un corps est transporté mécaniquement d'un endroit où il absorbe de la chaleur à un autre endroit où l'énergie emmagasinée est utilisée.

Les vibrations moléculaires des corps sont supposées se transmettre par l'*éther*, milieu hypothétique infiniment élastique, répandu dans tout l'univers, remplissant aussi bien les espaces

[1] Tyndall. *La chaleur, mode du mouvement.*

Digitized by Google

infiniment grands, que les espaces infiniments petits : les molécules en mouvement choqueraient l'éther, y produisant une onde qui se transmet à distance, jusqu'à ce que des molécules animées d'un mouvement vibratoire plus faible que celui qui a produit l'onde, rencontrées par celle-ci accéléreraient leur mouvement sous sa poussée.

D'après les récents travaux du professeur Dewar, l'hypothèse de l'éther admise par le monde savant paraît devoir être remplacée par celle de la matière pondérable, à un état de division telle que nous ne saurions même l'imaginer. Au cours d'une conférence donnée en janvier 1894 au Royal Institution à Londres, le professeur Dewar a montré qu'après avoir fait le vide dans une ampoule de verre, de manière à ce qu'elle ne contienne que de la vapeur de mercure à un millionième d'atmosphère, en la refroidissant à — 200° au moyen de l'air liquide, les vapeurs mercurielles ne se condensent pas en totalité car il existe encore dans l'ampoule une atmosphère gazeuse, qui donne passage à un courant électrique à très haute tension.

Dans ces conditions, il est permis de se demander si le vide supposé parfait des espaces interplanétaires peut exister, et si la transmission des vibrations calorifiques et lumineuses qui les traversent n'est pas une preuve de la continuité de la matière dans l'univers tout entier.

La chaleur, mouvement moléculaire, se transmet donc toujours par un milieu continu, soit qu'elle passe de l'une à l'autre partie d'un même corps, ou d'un corps à un autre.

D'après la théorie dynamique de la chaleur, les molécules des corps possèdent toujours une certaine quantité d'énergie : la disparition complète de l'énergie d'un corps correspondrait au repos absolu de ses molécules. En appliquant à l'air la loi de Mariotte sur la force élastique des gaz, et en supposant qu'il soit toujours un gaz parfait, la température à laquelle la force élastique de l'air devient nulle est de — 273°. C'est la température admise jusqu'ici pour le *zéro absolu*, qui correspondrait à la disparition complète de l'énergie sur notre planète.

Cette limite a pu être admise jusqu'au moment où les progrès de la science ont permis la liquéfaction des gaz jusqu'alors consi-

Digitized by Google

dérés comme permanents, tels que l'air, l'oxygène, l'hydrogène, etc. En admettant que la liquéfaction de ces corps se fasse aux environs de 273° au-dessous de zéro, cette température ne correspond plus au zéro absolu, en tant que disparition complète des mouvements moléculaires. Elle ne serait en réalité que la limite à laquelle disparaît leur force élastique.

Dans ces conditions, la détermination du zéro absolu est impossible dans l'état actuel d'avancement de la science et toutes les théories basées sur la température de — 273° comme valeur du zéro absolu sont erronées : le cycle de Carnot est dans ce cas.

Lorsqu'un corps reçoit une quantité d'énergie calorifique, celle-ci se divise en deux parties : l'une qui se transforme en *travail interne* pour écarter les molécules en s'opposant à l'attraction qu'elles exercent entre elles, et *externe* pour vaincre les pressions extérieures qui s'exercent à la surface du corps et s'opposent à son augmentation de volume : l'autre qui élève la température du corps, et qui seule se révèle à nos sens. Mais si le corps se refroidit, la quantité de chaleur absorbée par le travail moléculaire est intégralement restituée.

Chaleur spécifique. Calorie. — Si l'on mélange 1 kilogramme de mercure à 100° avec 1 kilogramme d'eau à 0°, on voit que la température du mercure baisse de 97° et celle de l'eau ne monte que de 3°. L'eau a ainsi la propriété de recevoir pour s'échauffer de 1° environ 32 fois la quantité de chaleur qui suffit à un poids égal de mercure pour que sa température s'élève de 1°. L'eau a donc pour la chaleur une plus grande capacité que le mercure.

La quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de l'unité de poids d'un corps varie suivant le poids atomique de ce corps, et lui est inversement proportionnelle. Cette capacité pour la chaleur s'appelle la *chaleur spécifique* d'un corps, et dans presque tous les cas le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique des différents corps est une constante.

La *calorie*, quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de 1 kilogramme d'eau à 4°, maximum de sa den-

Digitized by Google

sité, a été prise pour unité de mesure des chaleurs spécifiques des corps : c'est une unité relative et non absolue.

Equivalent mécanique de la chaleur. — La chaleur n'étant qu'une forme de mouvement, elle peut se transformer en travail ou naître de la transformation du travail : de nombreux physiciens ont cherché à déterminer la valeur de la calorie par la mesure directe de sa transformation en travail, et voici les résultats de leurs expériences :

Observateurs.	Date.	Résultat.
Joule.	1843	424,6-460-499
Id.	1845	443,8-437,8-488,3
Id.	1847	428,9
Id.	1850	423,9-424,7-425,2
Hirn.	1857	413,0-371,6
Quintus Icilius, Weber.	Id.	399,7
Weber, Bosscha, Favre et Silbermann.	Id.	432,1
Favre.	1858	413,2-443
Hirn.	Id.	400-450-425
Lenz-Weber.	1859	396,4-478,2
Joule, Bosscha.	Id.	419,5
Hirn.	1860	432-425
Id.	1860-1861	420-432
Edlund.	1865	443,6-430,1-428,3
Joule.	1867	429,5
Violle.	1870	435,2-434,9-435,8-437,4
Puluj.	1876	426,6
Joule.	1878	423,9
H.-F. Weber.	Id.	428,15
Rowland. 5°	1880	429,8
Rowland. 36°	1880	425,8
Haga.	1882	437,8-428,1
Cantoni.	Id.	423,8
Pérot.	1888	424,6
Dieterici.	1889	432
D'Arsonval.	1891	423
Sahulka.	Id.	426,3
Miculescu.	1892	426,7

On a adopté, comme terme d'équivalence, la moyenne des expériences les plus rigoureuses dont les résultats concordaient, et d'après cette moyenne le travail effectué par la transformation de l'unité de chaleur est égal à celui qu'il faut développer pour

Digitized by Google

élever un poids de 425 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en 1 seconde. La *calorie* vaut donc *425* kilogrammètres, et ce chiffre s'appele l'*équivalent mécanique de la chaleur*. Inversement la disparition du travail de 1 kilogrammètre dégage 1/425 de calorie : c'est l'*équivalent calorifique du travail*, dont le *kilogrammètre* est l'unité.

CHALEURS SPÉCIFIQUES MOYENNES DES PRINCIPAUX CORPS ENTRE 0° ET 100°

NOMS DES SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques.	NOMS DES SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques.
CORPS SOLIDES			
1° Métaux et métalloïdes.		Magnésie	0,244
Sodium	0,293	Borate de soude . . .	0,238
Magnésium	0,250	Sulfate de soude . . .	0,231
Aluminium.	0,218	Phosphate de soude. .	0,228
Soufre ordinaire . . .	0,203	Sulfate de magnésie .	0,221
— mou, trempé .	0,184	Carbonate de potasse.	0,216
Phosphore ordinaire .	0,179	Carbonate de chaux (craie).	0,215
— rouge. . .	0,170	Chlorure de sodium. .	0,214
Potassium.	0,170	Carbonate de chaux (marbre).	0,210
Fonte de fer.	0,130	Carbonate de chaux (spath)	0,208
Manganèse.	0,120	Carbonate de chaux (aragonite).	0,208
Acier	0,117	Alumine.	0,198
Fer[1]	0,114	Sulfate de chaux. . .	0,196
Nickel.	0,108	Chlorure de calcium .	0,164
Cobalt.	0,107	Nitrate d'argent . . .	0,143
Zinc.	0,096	Chlorure de cuivre . .	0,138
Cuivre.	0,095	Sulfure de zinc. . . .	0,123
Laiton.	0,094	Bromure de potassium.	0,113
Arsenic	0,081	Iodure de potassium .	0,082
Palladium	0,059	Sulfure d'argent . . .	0,074
Argent.	0,057	**3° Matières diverses.**	
Cadmium	0,057	Bois de pin	0,650
Etain	0,056	Bois de chêne	0,570
Iode.	0,054	Glace (eau solide). . .	0,501
Antimoine	0,051	Charbon de bois . . .	0,241
Or	0,032	Coke	0,201
Platine	0,032	Verre (crown-glass). .	0,198
Plomb.	0,031	Cristal (flint-glass) . .	0,190
Bismuth.	0,031		
Mercure solide	0,031		
2° Oxydes, sels anhydres.			
Carbonate de soude. .	0,273		

[1] D'après Dulong et Petit, la chaleur spécifique du fer serait la suivante :

De 0° à 100°	0,110	0° à 300°	0,122
De 0 à 200	0,115	0 à 350	0,126

Digitized by Google

NOMS DES SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques.	NOMS DES SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques.
	LIQUIDES		
Alcool à 85°	0,659	Acide sulfurique (1,80).	0,335
Acide chlorhydrique .	0,600	Huile d'olive.	0,310
Alcool absolu	0,579	Sulfure de carbone. .	0,238
Ether absolu.	0,533	Chloroforme.	0,225
Essence de térébenth.	0,421	Brome.	0,111
Benzine	0,399	Mercure.	0,033
	GAZ (sous pression constante).		
Air	0,2375	Chlore.	0,1210
Oxygène.	0,2175	Vapeur de brome. . .	0,0555
Azote	0,2438	Acide sulfureux. . . .	0,1544
Hydrogène.	3,4046	Acide chlorhydrique .	0,1845
Acide carbonique. . .	0,2169	Acide sufhydrique . .	0,2432
Protoxyde d'azote . .	0,2262	Gaz ammoniac. . . .	0,5084
Oxyde de carbone .	0,2370	Ether chlorhydrique .	0,2737
Gaz oléfiant	0,5930	Bioxyde d'azote . . .	0,2317
Vapeur d'eau.	0,4750		

Conductibilités relatives des corps solides. — Nous avons déjà dit que les mouvements moléculaires provoqués par l'absorption de l'énergie calorifique se transmettent à la surface des corps par *contact* et par *rayonnement ;* par *conductibilité* dans la masse même des corps. Dans les corps à l'état liquide ou gazeux la transmission se fait surtout par *convection :* leur conductibilité est presque nulle, exception faite pour le mercure et l'hydrogène.

Les corps solides ne conduisent pas tous également bien la chaleur : en prenant pour unité relative la conductibilité de l'argent, MM. Wiedmann et Franz ont obtenu les résultats suivants pour la valeur de la conductibilité de quelques métaux :

Argent	1
Cuivre	0,74
Or	0,53
Laiton	0,24
Etain.	0,15
Fer, acier.	0,12
Plomb	0,09
Platine	0,08
Maillechort	0,06
Bismuth	0,02

Loi de la conductibilité. — Si un corps solide est terminé par

Digitized by Google

deux faces parallèles, maintenues chacune à une température constante, mais celle de l'une plus élevée que celle de l'autre, il y aura pour ainsi dire écoulement continu de chaleur de la face la plus chaude à l'autre.

La loi de la conductibilité, dans ce cas, est que la quantité de chaleur qui traverse le corps dans l'unité de temps pour l'unité de surface perpendiculaire à la direction de la transmission, est en raison directe de la différence de température des faces opposées, et en raison inverse du chemin à parcourir.

La relation qui exprime ces conditions est donnée par la formule suivante :

$$Q = \frac{c\,(t - t')}{e}$$

dans laquelle Q est la quantité de chaleur, t la température de la face la plus chaude, t' la température de l'autre face, e la distance entre les deux faces et c la valeur de la *conductibilité absolue* de la matière, qui varie suivant les corps.

Conductibilité absolue des corps solides. — Péclet (*Traité de la chaleur*) a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la conductibilité absolue de différents corps.

Il a trouvé que la quantité de chaleur qui traverse en une seconde une plaque de plomb de 1 millimètre d'épaisseur, ayant une surface de 1 mètre carré et dont les deux faces sont maintenues à des températures constantes et différant de 1° est de 3 calories 82. Ce nombre a fait autorité pendant longtemps : mais M. Neumann (*Annales de chimie et de physique*, 3e série, vol. LVI) a réalisé des expériences beaucoup plus complètes et rigoureuses, car le rapport entre les conductibilités absolues du fer et du cuivre y est sensiblement le même que pour leur conductibilité relative, d'après MM. Wiedmann et Franz. En prenant pour base la conductibilité absolue du fer mesurée par M. Neumann, et les rapports des conductibilités relatives de MM. Wiedmann et Franz nous pouvons dresser le tableau suivant qui nous donne le nombre de calories qui traversent en une seconde pour 1° de différence une plaque de

Digitized by Google

1 mètre carré et de 1 millimètre d'épaisseur des métaux suivants :

Argent	136 calories.
Cuivre	100 —
Or	72,5 —
Laiton	32,1 —
Zinc	25,8 —
Etain	19,7 —
Fer	16,4 —
Acier	15,8 —
Plomb	11,5 —
Platine	11,4 —
Palladium	8,6 —
Bismuth	2,4 —

M. Angstrôm (*Annales de chimie et de physique*, 3e série, vol. LVII) a fait aussi des expériences dont les résultats concordent avec celles de M. Neumann pour le fer (16 cal. 3), mais ne donnent pour le cuivre que 92 calories au lieu de 110 cal. 8, nombre de M. Neumann. Le nombre de MM. Wiedmann et Franz se trouve être la moyenne de ceux de Neumann et Angstrôm. Cette différence semble ne devoir être attribuée qu'à la difficulté d'obtenir, à l'époque des expériences, des barres de cuivre pur.

Transmission par contact. — La transmission de la chaleur par contact n'est qu'un cas particulier de conductibilité d'un milieu à un autre : la rapidité de la transmission dans ce cas est fonction des chaleurs spécifiques des corps en contact : nous reviendrons plus longuement sur ce mode de transmission au chapitre suivant.

Transmission par rayonnement. — La transmission par rayonnement, d'après la théorie admise, a lieu par l'intermédiaire de l'éther : nous avons vu que ce fluide hypothétique n'est fort probablement que la matière à un état de division extrême, et dont la conception même nous échappe.

Par une expérience classique Rumford avait cru démontrer que la chaleur rayonnante traverse le vide : à cet effet il plaçait un thermomètre dans un ballon en verre dans lequel il faisait un vide barométrique. En plongeant une partie du ballon dans l'eau chaude, le thermomètre montait instantanément, avant que les parois du ballon non immergées dans l'eau eussent pu par con-

Digitized by Google

ductibilité transmettre de la chaleur à la tige du thermomètre.

Le vide tel que nous pouvons l'obtenir, n'est jamais absolu, et il est évident que la chaleur transmise dans l'expérience de Rumford, l'a été par la matière qui remplissait le ballon (vapeur mercurielle), dans cet état particulier de raréfaction qui lui permet de devenir le conducteur par excellence de la chaleur et de lui faire traverser les milieux interplanétaires. Si l'on taille une lentille biconvexe dans de la glace, et qu'on l'expose aux rayons du soleil, la quantité de chaleur qui la traverse et se concentre à son foyer est suffisante pour enflammer du bois, tandis que celle qui est absorbée par l'eau solidifiée la fait fondre sans l'échauffer. Cette expérience est due à M. Prévost (*Journal de Physique de Delamétherie* 1811) lequel a également montré que la quantité de chaleur qui traverse en un temps donné une nappe d'eau est toujours la même, soit que l'eau soit immobile et s'échauffe, soit qu'on la renouvelle en la faisant couler assez rapidement pour que la nappe traversée soit à une température constante.

La transmission de la chaleur par rayonnement est donc un cas particulier de conductibilité : sa vitesse de propagation est supposée être la même que celle de la lumière, 300 000 kilomètres par seconde en chiffres ronds, car elle se réfléchit, se disperse, se diffuse, se réfracte et se polarise : elle suit dans ces phénomènes les mêmes lois que la lumière, et, comme celle-ci, elle paraît être transmise par le même ordre de vibrations, dans toutes les directions autour du corps rayonnant et en ligne droite.

Vitesse de refroidissement. — Tous les corps émettent et absorbent simultanément de la chaleur rayonnante dans toutes les directions. Lorsque la quantité de chaleur rayonnante que reçoit la surface d'un corps placé dans le vide est moindre que celle qu'il émet, sa température baisse : il se refroidit. Newton a étudié les lois de cet abaissement de température, qui pour une très petite variation rapportée à l'unité du temps, s'appelle *vitesse de refroidissement*, et a énoncé la relation suivante :

La vitesse moyenne de refroidissement d'un corps est proportionnelle à l'excès moyen de sa température sur celle de l'enceinte.

Dulong et Petit (*Annales de Chimie et de Physique*, 2e série,

Digitized by Google

vol. VII) ont démontré que cette loi n'était pas générale et que lorsque l'excès de température dépassait 20 à 30°, la valeur de la vitesse moyenne de refroidissement était plus grande.

Dans ce que nous appelons le vide, la vitesse de refroidissement ne provient que du rayonnement, elle est la même pour tous les corps, mais elle varie suivant la nature des surfaces, l'excès de température, et la température de l'enceinte : dans l'air ou dans tout autre corps gazeux, la transmission de chaleur par contact entre le corps rayonnant et le fluide s'ajoute au rayonnement : cette quantité de chaleur transmise par contact ne varie que d'après la forme du corps et l'excès de sa température sur celle du fluide.

Pouvoirs émissifs relatifs des corps solides. — De la vitesse de refroidissement des corps dans le vide on peut déduire la valeur de la quantité de chaleur rayonnante émise dans l'unité de temps par l'unité de surface.

Voici à températures égales, les *pouvoirs émissifs relatifs*, c'est-à-dire les quantités de chaleur rayonnante émises par quelques corps, celle émise par le noir de fumée étant prise pour l'unité.

		Observateurs.
Noir de fumée	1	
Blanc de céruse	1	Leslie et Melloni.
Papier	0,98	Leslie.
Cire à cacheter	0,95	Id.
Colle de poisson	0,91	Melloni.
Id.	0,80	Leslie.
Verre blanc ordinaire	0,90	Id.
Encre de Chine	0,88	Id.
Id.	0,85	Melloni.
Gomme laque	0,72	Id.
Plomb terne	0,45	Leslie.
Mercure	0,20	Id.
Plomb décapé	0,19	Id.
Fer poli	0,15	Id.
Surfaces métalliques	0,12	Melloni.
Platine laminé	0,10	Desains.
Id. bruni	0,09	Id.
Argent mat, déposé chimiquement	0,054	Id.
Cuivre en lames	0,05	Id.
Or en feuilles	0,043	Id.
Argent bruni	0,025	Id.

Digitized by Google

Formules de Péclet. — Péclet (*Traité de la chaleur*, vol. I) donne les formules suivantes pour le calcul de la quantité de chaleur émise par un corps par rayonnement, et par contact avec le fluide environnant :

« La quantité de chaleur émise par rayonnement dans une enceinte dont la température diffère peu de 12° et pour des excès de température compris entre 25 et 65° est donnée par la formule :

$$R = Kt\,(1 + 0{,}0056\,t) \qquad (a)$$

« K est un coefficient qui dépend de la nature de la surface ; t est l'excès de température.

« La quantité de chaleur perdue par le contact de l'air dans les mêmes circonstances est donnée par la formule :

$$A = K'\,t\,(1 + 0{,}0075\,t) \qquad (b)$$

« K' est un coefficient qui dépend de la forme et des dimensions du corps ; t est l'excès de température.

« Quand l'excès de température est faible, on peut négliger les termes du second degré, et on a pour la quantité totale de chaleur émise :

$$M = R + A = (K + K')\,t = Qt$$

« c'est-à-dire la loi de Newton. »

Formules de Dulong et Petit. — Péclet n'a déterminé expérimentalement ses formules que pour des excès de température compris entre 25 et 65°, et recommande pour des écarts plus considérables l'emploi des formules suivantes de Dulong et Petit :

1° La vitesse du refroidissement provenant du rayonnement est la même pour tous les corps, mais sa valeur absolue varie avec la nature des surfaces. Elle est représentée par la formule

$$v = ma^{t_1}\,(a^t - 1) \qquad (1)$$

dans laquelle m représente un nombre qui dépend de la nature de la surface du corps, a le nombre 1,0077, t_1 la température de l'enceinte, et t l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte ;

2° La vitesse du refroidissement provenant du contact du fluide

Digitized by Google

environnant est aussi la même pour tous les corps ; mais sa valeur absolue est indépendante de la nature de la surface ; elle ne dépend que de la forme du corps et de l'excès de sa température sur celle de l'enceinte. Cette vitesse pour l'air, sous la pression de 0,76, est représentée par la formule

$$v = nt^{1,233} \qquad (2)$$

dans laquelle n est un nombre variable avec la forme et l'étendue de la surface du corps, et t l'excès de la température du corps sur celle de l'air environnant.

Des formules relatives aux vitesses de refroidissement, Dulong et Petit ont déduit les formules suivantes relatives aux quantités de chaleur émises par la surface d'un corps, par mètre carré et par heure.

1° Pour le rayonnement :

$$R = 124,72 \times Ka^{t} (a^{t} - 1) \qquad (3)$$

2° Pour le contact

$$A = 0,552\ K't^{1,233} \qquad (4)$$

dans lesquelles K est un coefficient variant avec la nature de la surface des corps et K′ un coefficient variant avec la forme et la dimension des corps.

Valeurs de K et de K′. — Voici d'après Peclet (*Traité de la chaleur*, vol. I) les valeurs de K pour différentes matières :

Argent poli	0,13	Charbon en poudre	3,42
Cuivre rouge	0,16	Poussière de bois	3,53
Etain	0,215	Pierre à bâtir	3,60
Papier doré	0,23	Plâtre	3,60
Zinc	0,24	Bois	3,60
Laiton poli	0,258	Sable fin	3,62
Papier argenté	0,42	Calicot	3,65
Tôle polie	0,45	Etoffes de laine	3,68
Tôle plombée	0,65	Etoffes de soie	3,71
Tôle ordinaire	2,77	Peinture à l'huile	3,71
Verre	2,91	Papier	3,77
Fonte neuve	3,17	Noir de fumée	4,01
Craie en poudre	3,32	Eau	5,31
Fonte oxydée	3,36	Huile	7,24
Tôle oxydée	3,36		

Digitized by Google

Les valeurs de K′ pour les cylindres horizontaux à base circulaire sont données d'après Peclet par la relation.

$$K' = 2{,}058 + \frac{0{,}0382}{r}$$

r = rayon du cylindre	0m,05	0m,10	0m,15	0m,20	0m,25	0m,30	0m,40
Valeur de K′	2,82	2,44	2,30	2,25	2,21	2,18	2,15

Pour les surfaces planes verticales, la valeur de K′ est donnée par la formule empirique,

$$K' = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{h}}$$

h étant la hauteur verticale de la surface.

Le tableau suivant donne les valeurs de K′ pour diverses valeurs de h.

VALEURS DE h	VALEURS DE K′	VALEURS DE h	VALEURS DE K′	VALEURS DE h	VALEURS DE K′
0m,10	3,848	0m,60	2,585	5m	2,05
0,20	3,186	1	2,400	10	1,96
0,30	2,926	2	2,21	15	1,92
0,40	2,770	3	2,13	20	1,90
0,50	2,66	4	2,08		

TABLEAU DES VALEURS DE R PAR MÈTRE CARRÉ ET PAR HEURE ENCEINTE A 15° (d'après Péclet).

EXCÈS de température.	VALEURS DE R	EXCÈS de température.	VALEURS DE R
10°	11,2 . K	90°	138,7 . K
	1,14. K $(t - t_1)$		1,59. K $(t - t_1)$
20	23,2 . K	100	161,3 . K
	1,18. K $(t - t_1)$		1,65. K $(t - t_1)$
30	36,1 . K	110	185,3 . K
	1,22. K $(t - t_1)$		1,72. K $(t - t_1)$
40	50,1 . K	120	211,3 . K
	1,28. K $(t - t_1)$		1,80. K $(t - t_1)$
50	65,3 . K	130	239,3 . K
	1,35. K $(t - t_1)$		1,87. K $(t - t_1)$
60	81,7 . K	140	269,5 . K
	1,43. K $(t - t_1)$		1,97. K $(t - t_1)$
70	99,3 . K	150	302,1 . K
	1,50. K $(t - t_1)$		2,06. K $(t - t_1)$
80	118,5 . K	160	339,0 . K
	1,55. K $(t - t_1)$		2,17. K $(t - t_1)$

Digitized by Google

EXCÈS de température.	VALEURS DE R	EXCÈS de température.	VALEURS DE R
170°	377,4 . K 2,27. K $(t - t_1)$	220°	619,0 . K 2,88. K $(t - t_1)$
180	418,5 . K 2,38. K $(t - t_1)$	230	679,5 . K 3,03. K $(t - t_1)$
190	463,2 . K 2,50. K $(t - t_1)$	240	744,8 . K 3,24. K $(t - t_1)$
200	511,2 . K 2,62. K $(t - t_1)$	250	848,7 . K
210	563,1 . K 2,75. K $(t - t_1)$		

TABLEAU DES COEFFICIENTS RELATIFS A LA TEMPÉRATURE DE L'ENCEINTE, 15° = 1 (d'après Péclet).

Température	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
Coefficient	0,89	0,96	1,04	1,12	1,21	1,31	1,41	1,52	1,65	1,78	1,92

TABLEAU DES VALEURS DE A PAR MÈTRE CARRÉ ET PAR HEURE (d'après Péclet).

EXCÈS de température.	VALEURS DE A	EXCÈS de température.	VALEURS DE A
10°	9,4 . K' 1,05 . K' $(t - t_1)$	140°	244,4 . K' 1,76. K' $(t - t_1)$
20	22,2 . K' 1,176. K' $(t - t_1)$	150	266,1 . K' 1,79. K' $(t - t_1)$
30	36,6 . K' 1,27 . K' $(t - t_1)$	160	288,1 . K' 1,81. K' $(t - t_1)$
40	52,2 . K' 1,34 . K' $(t - t_1)$	170	310,5 . K' 1,83. K' $(t - t_1)$
50	68,6 . K' 1,40 . K' $(t - t_1)$	180	333,2 . K' 1,85. K' $(t - t_1)$
60	86,0 . K' 1,46 . K' $(t - t_1)$	190	356,1 . K' 1,88. K' $(t - t_1)$
70	104,0 . K' 1,51 . K' $(t - t_1)$	200	379,4 . K' 1,90. K' $(t - t_1)$
80	122,6 . K' 1,55 . K' $(t - t_1)$	210	402,9 . K' 1,92. K' $(t - t_1)$
90	141,7 . K' 1,59 . K' $(t - t_1)$	220	426,7 . K' 1,95. K' $(t - t_1)$
100	161,5 . K' 1,63 . K' $(t - t_1)$	230	450,7 . K' 1,97. K' $(t - t_1)$
110	181,5 . K' 1,65 . K' $(t - t_1)$	240	475,0 . K' 1,99. K' $(t - t_1)$
120	202,1 . K' 1,70 . K' $(t - t_1)$	250	498,6 . K'
130	223,1 . K' 1,74 . K' $(t - t_1)$		

Digitized by Google

Quantité de chaleur émise. — En examinant les tableaux qui donnent les valeurs de R et de A, on voit que pour de grands écarts de température les coefficients varient, au lieu de rester constants comme cela découlerait de la loi de Newton : celle-ci toutefois paraît exacte et est admise pour de faibles écarts de températures, et les valeurs intermédiaires de R et de A dans les tableaux qui précèdent pourront être calculées sans erreur sensible à l'aide des formules intercalées dans ces tableaux entre deux excès de température consécutifs.

La quantité totale de chaleur émise par un corps dans l'air est donc donnée par la relation.

$$Q = R + A$$

En appliquant les valeurs données par les deux tableaux de Péclet, on obtient par des calculs très simples, des chiffres d'une approximation suffisante. Ainsi pour un cylindre en tôle de 1 mètre de diamètre, contenant de la vapeur d'eau sous pression, placé dans une atmosphère à 20°, les quantités de chaleur émise par mètre carré de surface et par heure seraient les suivantes, en adoptant les formules de Péclet.

Pression en atmosphères absolues.	1	2	3	4	5	6	7	8
Pression en atmosphères effectives.	0	1	2	3	4	5	6	7
Excès de température.	80°	101°	115°	125°	133°	140°	146°	152°
Q = R + A en calories.	671	915	1015	1224	1355	1428	1523	1649
Poids de vapeur condensée par m² et par heure.	1k,25	1k,75	1k,97	2k,42	2k,71	2k,88	3k,10	3k,38

Digitized by Google

Les chiffres ci-dessus font clairement ressortir la nécessité de recouvrir les surfaces des chaudières et des conduites de vapeur d'une substance mauvaise conductrice de la chaleur.

Considérations sur les formules de Dulong et Petit. — Dans la formule de Dulong et Petit relative au pouvoir rayonnant d'une surface

$$R = 124{,}72 \times K a^{t_1} (a^t - 1)$$

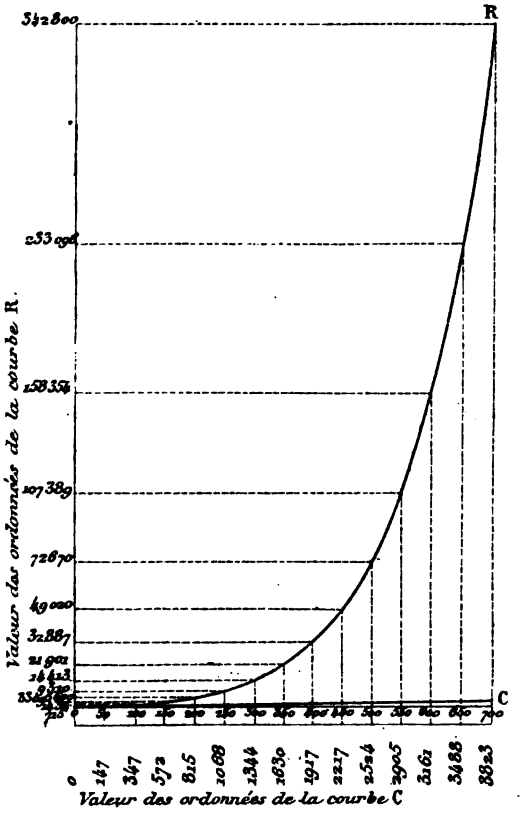
la constante a a été calculée égale à 1,0077. De la Provostaye et Desains (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, vol. XVI) ont prouvé que la valeur de a varie pour différents corps et pour différentes conditions d'expériences. M. Witz (*Journal de Physique*, 1re série, vol. VIII) et M. Rivière (*Journal de Physique*, 2e série, vol. III) ont repris l'étude de la vitesse de refroidissement dans les gaz, et les résultats obtenus confirment ceux de la Provostaye et Desains. Dans ces conditions tous les calculs relatifs à l'émission de la chaleur ne peuvent être considérés comme rigoureusement exacts. Les constantes déterminées par Dulong et Petit et par Péclet ne s'appliquent qu'aux conditions particulières dans lesquelles ils ont opéré, qui ne sont pas celles de la pratique, et la séparation entre le rayonnement et la conductibilité par contact ne paraît pas avoir été suffisamment complète dans leurs expériences; en outre on a, dans ceux-ci, supposé l'air immobile, et le plus léger mouvement a une grande influence sur la quantité de chaleur émise par la surface qui se refroidit : celle-ci est également influencée par la densité du corps et l'état de sa surface : les résultats du calcul ne doivent donc être considérés que comme une approximation suffisante pour guider les ingénieurs.

Quantités de chaleur absorbées. — Les formules peuvent donc être considérées comme représentant exactement la loi du refroidissement mais non les quantités de chaleur réellement émises par les surfaces.

Dans cet ordre d'idées les formules donnent des indications de la plus haute importance au point de vue de la transmission de la chaleur : dans la formule (1) page 87, les températures des

Digitized by Google

corps rayonnants et absorbants entrent comme exponents, de sorte que si la température du corps absorbant est constante, comme dans le cas de l'eau au-dessus des tôles de coup de feu dans les chaudières, la quantité de chaleur rayonnée par le foyer et absorbée par l'eau augmentera avec une grande rapidité avec



ÉCARTS de températures.	QUANTITÉ DE CHALEUR ABSORBÉE PAR	
	RAYONNEMENT	CONTACT
Degrés C.	Calories.	Calories.
0	0	0
50	715	147
100	1438	347
150	3309	572
200	5600	815
250	9310	1068
300	14413	1344
350	21901	1630
400	32887	1917
450	49020	2217
500	72670	2524
550	107389	2905
600	158354	3161
650	233096	3488
700	342800	3823

Fig. 25.

l'élévation de température de la couche du combustible en ignition.

La deuxième formule de Dulong et Petit, page 88, relative à la vitesse de refroidissement par contact, nous fait voir d'un autre côté que pour ce cas l'excès de température est un facteur à exponent fixe (1,233). L'influence de l'augmentation de température des gaz dans le foyer d'une chaudière n'est pas aussi considérable que pour le rayonnement.

Digitized by Google

Une courbe représente bien à l'œil les déductions que l'on peut tirer des lois générales énoncées par Dulong et Petit. Dans le diagramme (fig. 25) la ligne des abscisses représente les excès de températures entre le corps rayonnant ou les gaz chauds et le corps absorbant, et la ligne des ordonnées représente le nombre de calories absorbées par un corps à température constante.

Les ordonnées de la courbe C représentent la quantité de chaleur transmise par contact, et celle de la courbe R la quantité de chaleur transmise par rayonnement par mètre carré et par heure.

Ces quantités ont été calculées pour les conditions qui se présentent dans le foyer d'une chaudière à vapeur, et l'examen de la courbe fait ressortir clairement l'influence considérable du rayonnement : pour de faibles écarts de température les deux courbes se confondent : pour un écart de température de 350°, la quantité de chaleur absorbée par les tôles par contact avec les gaz chauds est de 1 630 calories, et celle absorbée par rayonnement est de 21 901 calories par mètre carré et par heure, c'est-à-dire environ quatorze fois plus. Pour un écart de température double, 700°, l'absorption par contact est de 3 823 calories, et par rayonnement de 342 800 calories, quatre-vingt-dix fois plus importante.

Les considérations qui précèdent sont basées sur l'égalité admise des vitesses de réchauffement et de refroidissement, c'est-à-dire que pour un même écart de température la quantité de chaleur rayonnante absorbée par un corps est la même que celle qu'il peut émettre, et la quantité de chaleur absorbée par contact avec les gaz chauds est la même que celle émise en réchauffant le gaz : c'est ce qui paraît ressortir des résultats des expériences de Leslie et de Melloni, la direction dans laquelle se transmet la chaleur paraissant d'après ces expériences être sans influence sur la quantité qui est transmise.

Digitized by Google

CHAPITRE V

PUISSANCE DE VAPORISATION DES SURFACES DE CHAUFFE

Absorption de la chaleur dans les chaudières. — En considérant les résultats donnés par les formules de Dulong et Petit, il faut tenir compte de ce qu'elles ne s'appliquent qu'à des écarts de température constants. Dans une chaudière nous pouvons admettre que la température de la surface rayonnante du combustible sur la grille est maintenue constante par une combustion continue et méthodique. Quant à la constance de l'écart de température entre les gaz chauds et les parois du générateur, celle-ci est obtenue par l'évacuation dans la cheminée des produits de la combustion, qui sont remplacés à mesure de leur refroidissement par de nouveaux gaz chauds dégagés dans le foyer.

Ce qui précède suppose que le combustible ne produise pas de flammes, car celles-ci étant lumineuses absorbent et transmettent la chaleur rayonnante : il importe donc, pour utiliser cette quantité de chaleur émise par les flammes, de disposer les conduits reliant le foyer à la cheminée d'appel de façon à ce que les flammes ne s'éteignent pas immédiatement après avoir quitté le foyer ; dans ce dernier cas les parois du générateur léchées par ces gaz non lumineux n'absorbent que la chaleur rayonnée par l'air brûlé et surtout par les particules de suie et de cendres entraînées par le courant gazeux, lesquelles étant solides, rayonnent de la chaleur obscure. Dans ces conditions on est conduit à se demander si un peu de fumée n'est pas nécessaire pour la bonne utilisation du combustible.

Nous savons d'après Tyndall que l'air humide absorbe et par

Digitized by Google

conséquent émet, suivant sa teneur en vapeur d'eau, jusqu'à 70 fois la quantité de chaleur rayonnante absorbée par l'air sec : d'après le même savant, l'acide carbonique absorbe et émet 972 fois la quantité de chaleur rayonnante absorbée par l'air sec. Les produits de la combustion contiennent en général de 10 à 20 p. 100 d'acide carbonique, ce qui leur donne un pouvoir émissif de 100 ou 200 fois celui de l'air sec ; la teneur en humidité du combustible et de l'air contribuent encore à augmenter la quantité de chaleur obscure rayonnée par les gaz de la combustion.

L'on voit ainsi l'utilité de remplir d'eau les cuvettes de cendrier, et du mouillage du combustible, afin d'augmenter le pourcentage d'humidité de l'air, et partant son pouvoir rayonnant.

Surfaces de chauffe directe et indirecte. — La surface de chauffe d'une chaudière, c'est-à-dire la partie de ses parois métalliques qui absorbe la chaleur dégagée par le foyer pour la transmettre à l'eau se décompose en deux parties bien distinctes : l'une placée en regard de la grille, qui reçoit la chaleur rayonnante du foyer et celle de contact des gaz chauds : c'est la surface de chauffe directe ou surface de coup de feu ; l'autre qui n'absorbe que la chaleur de contact des gaz et le rayonnement des parois en maçonnerie s'il y en a, des corps solides entraînés, de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau contenue dans les gaz : c'est la surface de chauffe indirecte. La quantité de chaleur transmise par celle-ci dépend surtout de la rapidité avec laquelle les molécules gazeuses en contact, après avoir cédé une partie de leur chaleur sont remplacées par d'autres, car les corps gazeux ayant un pouvoir conducteur presque nul, ce n'est que la couche de contact qui peut transmettre la chaleur : il faut donc pour l'utilisation de ces surfaces de chauffe indirectes considérer la question de la circulation des gaz et faire intervenir les facteurs de la transmission de la chaleur par convection.

Influence de l'épaisseur du métal. — Dans la pratique l'épaisseur du métal et sa nature ont une influence inappréciable sur la quantité de chaleur transmise à l'eau par le contact des gaz

Digitized by Google

chauds : c'est un fait acquis par de nombreuses expériences, que chacun peut facilement reproduire : des récipients de mêmes forme et dimensions, de différents métaux, et pour chaque métal de différentes épaisseurs, après avoir été échauffés à 100° et remplis d'eau bouillante, exposés à la même source de chaleur, vaporiseront dans le même temps une même quantité d'eau. Boutigny s'est servi de récipients en argent pour cette démonstration expérimentale, c'est-à-dire du meilleur conducteur de la chaleur.

Il suffit en effet de considérer que lorsque l'épaisseur du métal augmente, ou que son coefficient de conductibilité diminue, la température de la surface extérieure de la paroi chauffée augmente, et la formule relative à la transmission de la chaleur au travers des corps solides,

$$Q = \frac{c\,(t - t')}{e}$$

nous fait voir que la quantité de chaleur transmise est constante pour un même rapport entre l'épaisseur du métal et la différence de température des surfaces d'absorption et d'émission.

La chaleur spécifique du métal et son épaisseur n'ont donc une influence qu'autant que les températures de l'eau et des gaz varient. Dans les chaudières l'on peut admettre que, en un même point, pendant le fonctionnement normal, les températures de l'eau et des gaz sont constantes : ce n'est en conséquence que pendant la mise en pression que se produit l'influence retardatrice des parois métalliques du générateur.

La formule de Dulong et Petit relative à la vitesse de refroidissement des gaz par contact

$$A = 0{,}552\ K'\,(t - t')^{1{,}333}$$

dans laquelle $t - t'$ est la différence des températures entre la surface métallique et la couche gazeuse en contact, en un point quelconque, nous donne la quantité de chaleur absorbée en cet endroit en une heure, le mètre carré étant pris pour unité. Il faut y ajouter la quantité de chaleur absorbée par rayonnement pour les causes énoncées plus haut. On suppose que celles-ci font approcher l'exponent de la formule du chiffre 2, mais les vérifications expérimentales ne sont pas encore suffisamment complètes.

Digitized by Google

Chaleur spécifique des gaz de la combustion. — Théoriquement la température qui accompagne la combustion doit être le rapport entre la puissance calorifique de l'unité de poids du combustible diminuée de la quantité de chaleur rayonnée, et le poids des gaz dégagés par la combustion multipliés par leur chaleur spécifique.

La chaleur spécifique des gaz de la combustion est facilement calculée à l'aide du tableau de la page 82.

Ainsi la combustion parfaite d'un kilogramme de carbone exigeant 2,66 kilogrammes d'oxygène [1] qui sont mélangés à 8,86 kilogrammes d'azote, nous poserons

Acide carbonique.	$3^k,66 \times 0,217 = 0,794$	2,956
Azote.	$8^k,86 \times 0,244 = 2,162$	
Poids des gaz . . .	$12^k,52$	

ayant une chaleur spécifique moyenne de

$$\frac{2,956}{12,52} = 0,236$$

En pratique le volume d'air introduit est souvent le double, et modifie la chaleur spécifique des produits de la combustion par l'humidité qu'il contient : en outre les houilles contiennent aussi de l'hydrogène et de l'eau, et la chaleur spécifique de la vapeur d'eau étant le double de celle de l'air, on obtient un chiffre encore plus élevé : pour les besoins de la pratique on obtiendra des résultats suffisamment approchés en prenant comme chaleur spécifique des gaz de la combustion 0,25.

Températures théoriques dans les foyers. — Péclet (*Traité de la chaleur*, vol. I) a fait quelques expériences sur la quantité de chaleur rayonnée par quelques combustibles : il a trouvé que le rapport entre la puissance calorifique et la chaleur rayonnée était :

Pour la houille	0,50
— le coke	0,55
— le bois.	0,29
— le charbon de bois	0,55

La quantité de chaleur rayonnée par un combustible incandescent dépend non seulement de la température du combustible et de celle du corps absorbant, mais aussi de l'activité de la

[1] Voir à l'avant-dernier chapitre.

Digitized by Google

combustion, qui est de beaucoup accrue par une augmentation de la vitesse d'arrivée de l'air.

En admettant pour la houille un rayonnement de la moitié de sa puissance calorifique, 9 à 8 000 calories, et l'admission d'un excès d'air de 33 à 100 p. 100, on obtient 1100° à 700° comme température dans le foyer des gaz de la combustion, et comme ceux-ci se refroidissent très vite en léchant les surfaces de chauffe indirecte, la puissance de vaporisation de celles-ci diminue rapidement : il y a donc le plus grand intérêt à renouveler rapidement les couches qui sont en contact avec le métal, en faisant passer à la surface des colonnes gazeuses les veines centrales, et en faisant cheminer la colonne avec une vitesse d'autant plus considérable que sa section est moindre.

Mesures expérimentales de la production des surfaces de chauffe. — On a essayé de déterminer expérimentalement la quantité d'eau évaporée par mètre carré des différentes surfaces de chauffe des chaudières industrielles.

Péclet (*Traité de la chaleur*, vol. I et II) relate les expériences de M. Christian qui a obtenu une vaporisation de 100 litres d'eau par mètre carré et par heure avec une chaudière en fonte de 25 millimètres d'épaisseur, et de M. Clément qui a obtenu cette même vaporisation avec une chaudière en cuivre de 3 millimètres d'épaisseur. Ces résultats n'ont d'intérêt que comme démonstration expérimentale du peu d'influence exercée sur la transmission de la chaleur par la nature et l'épaisseur du métal.

Il relate aussi l'expérience de M. Walter de Saint-Ange sur une chaudière à deux bouilleurs, de 13 mq. 46 de surface de chauffe totale. La surface des bouilleurs était 8 mq. 19. L'appareil était disposé pour que les gaz parcourussent ou non les carneaux du corps cylindrique avant de se rendre à la cheminée. En utilisant la surface de chauffe totale, la production moyenne a été 22 litres d'eau vaporisée par mètre carré et par heure et le rendement de 7 litres d'eau vaporisée par kilogramme de houille brûlée.

En n'utilisant que la surface de chauffe des bouilleurs on a vaporisé avec la même consommation de combustible 32,48 litres

Digitized by Google

d'eau par mètre carré et par heure, chaque kilogramme de combustible ayant vaporisé 6,18 litres d'eau.

La surface de chauffe du corps n'avait produit lors de la première expérience que 6,10 kilos de vapeur par mètre carré et par heure.

La production du corps cylindrique n'était donc qu'un peu plus que le 10e de la production totale : il est à remarquer que dans cette chaudière la surface de chauffe du corps était environ les deux tiers de celle des bouilleurs, condition particulière qui ne se rencontre pas dans la pratique, car la surface de chauffe en 2e et 3e retour est toujours beaucoup plus considérable que la surface de parcours direct.

M. Graham (*Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester*) a étudié l'absorption de la chaleur par les surfaces plates ; à cet effet il avait disposé à la suite les unes des autres quatre chaudières identiques : la première recevait seule le rayonnement du foyer, les autres étaient chauffées par contact avec les gaz du foyer qui passaient successivement sous chacune d'elles.

La quantité d'eau évaporée par chacune des chaudières dans le même temps était :

1re	2e	3e	4e
100	27	13	8

Les trois quarts de la surface de chauffe totale, c'est-à-dire la surface de chauffe indirecte, n'ont pu augmenter la production de vapeur de la surface de chauffe directe que de la moitié environ.

Les augmentations de productions respectives étaient :

Pour la deuxième chaudière environ 25 p. 100 ;

Pour la troisième chaudière environ 10 p. 100 ;

Pour la quatrième chaudière environ 5 p. 100.

M. Geoffroy a fait sur une chaudière locomotive au Chemin de fer du Nord les expériences suivantes [1]. La surface du foyer était de 7 mq. 14 : la surface tubulaire 66 mq. 64. La chaudière était cloisonnée à l'intérieur et partagée en cinq compartiments : le premier comprenant le foyer, les quatre autres le corps cylindrique.

[1] Couche. *Voie et Matériel roulant*, vol. III.

Digitized by Google

Les productions moyennes de vapeur ont été les suivantes :

Foyer.	Compartiments du corps tubulaire.				
	1er	2e	3e	4e	
44°/o	28°/o	15°/o	8°/o	5°/o	de la production totale.

Les augmentations de productions respectives ont été :

Pour le premier compartiment environ 65 p. 100 ;
Pour le deuxième compartiment environ 20 p. 100 ;
Pour le troisième compartiment environ 10 p. 100 ;
Pour le quatrième compartiment environ 5 p. 100.

Formule de M. Stromeyer. — M. Stromeyer (*Marine Boiler Management*) a discuté les observations de M. Geoffroy et a établi une formule permettant de calculer les quantités d'eau vaporisées dans chaque compartiment en fonction de la vitesse des gaz. En admettant que dans le foyer l'écart initial de température entre les produits de la combustion et l'eau était de 1100°, et que la chute de température dans le foyer était de 394°, les gaz pénétrant ainsi dans le faisceau tubulaire avec un écart de température de 706°, les résultats du calcul donnent pour chiffre théorique de la vaporisation un écart avec les résultats des expériences de :

16 p. 100 en moins pour le premier compartiment ;
13,5 p. 100 en plus pour le deuxième compartiment ;
41 p. 100 en plus pour le troisième compartiment ;
60 p. 100 en plus pour le quatrième compartiment.

Il explique ces différences par les entraînements d'eau qui ont dû se produire dans le premier compartiment à cause de la vaporisation active, et par la condensation par rayonnement dans les autres compartiments; la surface extérieure de chaque cloisonnement étant d'environ 3 mq., la condensation moyenne devait être de 12 kilos de vapeur par mètre carré et par heure.

En appliquant sa formule, M. Stromeyer trouve les valeurs suivantes pour la quantité d'eau vaporisée par mètre carré et par heure de surface tubulaire d'une chaudière.

Digitized by Google

Ecart de température en degrés F. . . .	2 000	1 500	1 000	500	300	200	100
en degrés C. . . .	1 111	833	555	277	166	111	55
Litres d'eau vaporisée par mètre carré et par heure	78	29	19,5	4,9	1,7	0,77	0,19

L'examen comparatif des chiffres ci-dessus et des valeurs des ordonnées de la courbe C du diagramme de la page 93 montre l'influence du rayonnement des corps solides entraînés par les gaz de la combustion et de leur teneur en acide carbonique et en vapeur d'eau.

Les calculs de M. Stromeyer supposent les gaz divisés en minces filets : lorsque les surfaces de chauffe terminales sont placées dans des carneaux à grande section, leur puissance de vaporisation diminue d'autant plus que les carneaux sont plus grands : on voit ainsi la nécessité de les limiter à un écart de température tel que la quantité de chaleur transmise à l'eau soit supérieure à celle qui est émise par la surface extérieure correspondante de la chaudière, l'augmentation de la surface de chauffe devenant nuisible à partir d'une certaine limite qui dépend du type d'appareil et de ses conditions d'installation.

Expériences de M. Hirsch. — M. Hirsch (*Annales du Conservatoire des Arts et Métiers*, 2e série, vol. I) a mesuré expérimentalement la puissance de vaporisation des surfaces de chauffe directe et indirecte d'une des chaudières du Conservatoire des Arts et Métiers. Cette chaudière est du système Farcot, composée d'un corps cylindrique de 3 mètres de long et 0,650 de diamètre, et de 4 réchauffeurs latéraux de 2 m. 50 de long et de 0,300 de diamètre.

La surface de chauffe du corps cylindrique ou surface directe est de . . . . . 3 mq. 30
Celles des réchauffeurs. . . . . 10 mq. 04
Surface de chauffe totale . . . . . 13 mq. 34
Surface de grille . . . . . 0 mq. 36

Voici le résultat de ces expériences :

Digitized by Google

DÉSIGNATION des expériences.		OUVERTURE du registre.	SOUFFLEUR	FEU	DURÉE de l'expérience.		CONSOMMATION totale.		CONSOMMATION de charbon par heure et mètre carré de surface de grille.	EAU FROIDE VAPORISÉE à 100° par heure et mètre carré de surface de chauffe.		
					Partielle	Totale	Charbon	Eau		de la chaudière.	de la chaudière et des réchauffeurs.	au coup de feu.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		mm.			minutes	h. m.	kilogr.	litres	kilogr.	litres	litres	litres
11 août. . .	A'*a*	100	fermé	très peu actif	50	2,30	72	392	80	47,51	11,75	125
	A*a*	85	fermé	bas	56							102
18 août. . .	C*a*	150	fermé	assez actif	41	2,0	100	436	140	66,66	16,50	143
	C'*a*	155	fermé	peu actif	39							135
21 août. . .	D*a*	200	fermé	actif	31	2,0	102	420	143	63,63	15,75	180
22 août. . .	E*a*	300	fermé	bien actif	21	2,0	130	550	182	83,33	20,62	245
	E'*a*	320	fermé	bien actif	34							159
24 août. . .	F*a*	520	fermé	bien actif	29	2,0	140	610	196	92,42	22,87	172
	F'*a*	520	fermé	très actif	30							184
	F''*a*	520	fermé	très actif	27							245
28 août. . .	H*a*	520	fermé	très actif	27	1,50	130	570	196	94,21	25,63	203
	H'*a*	520	fermé	très actif	30							193
25 août. . .	G*a*	520	ouvert de 0,24	très actif	37	1,40	140	430	235	81,81	20,25	145
	G'*a*	520	id.	violent	38							131
29 août. . .	I*a*	520	ouvert de 0,26	ardent	30	1,40	142	520	238	94,54	23,40	213
	I'*a*	520	id.	très vif	37							161

Digitized by Google

Voici les considérations dont M. Hirsch accompagne le tableau qui précède :

« En général, l'allure a été fort vive. La consommation de charbon, par heure et par mètre carré de grille (col. 10), n'est pas descendue au-dessous de 80 kilogrammes. Dans les chaudières fixes de l'industrie à foyer extérieur, on s'en tient le plus souvent à des chiffres de 50 à 60 kilogrammes. Dans les chaudières à foyer intérieur, type qui comporte des grilles de dimensions restreintes, on ne dépasse guère, avec tirage naturel, 100 à 120 kilogrammes : pour aller au delà, il faut recourir au tirage artificiel. Mais ce n'est qu'exceptionnellement, dans les générateurs fixes, qu'on arrive à 200 kilogrammes. Il est vrai que, dans les locomotives, on atteint et dépasse même 300 kilogrammes ; mais, dans ce type de chaudière, le ciel du foyer est très élevé au-dessus de la grille et moins directement exposé à l'action des flammes. Les nombres dépassant 150 kilogrammes correspondent donc à des allures, qu'avec le type de chaudière mis en expérience, on considérerait avec raison comme dangereuses. Les chiffres 235 et 238 correspondent à des allures à outrance.

« La vaporisation rapportée au mètre carré de surface de chauffe de la chaudière (col. 11) est extrêmement active. Au lieu des chiffres de 12 à 20 kilogrammes par heure, qui sont pratiqués en général dans les chaudières fixes, et des chiffres de 35 à 45 kilogrammes qui sont habituels dans les chaudières de locomotives, on voit figurer ici un minimum de 47 kilogrammes et un maximum de 94 kilogrammes. Ce sont des intensités de vaporisation qu'on ne rencontre pas dans la pratique. Il est vrai que la surface de chauffe de la chaudière proprement dite (3 mq. 30) est petite par rapport à la surface de grille (0 mq. 36) ; le rapport de ces deux surfaces n'est que de 9/1. Toutefois, si l'on tient compte des réchauffeurs, ce qui porte la surface de chauffe à 13 mq. 34, on arrive à un rapport de 37, qui rentre dans les proportions habituelles des chaudières à rendement élevé. Or, avec de pareilles chaudières, on s'en tient en général à des vaporisations de 8 à 12 kilogrammes d'eau froide par heure et par mètre carré de surface de chauffe, et l'on reste toujours

Digitized by Google

bien au-dessous des chiffres de 23 et 25 kilogrammes, portés à la colonne 12.

« Les nombres inscrits dans la colonne 13 sont ceux qui nous intéressent le plus. Aux allures relativement modérées, la vaporisation en eau froide, par heure et par mètre carré de surface de chauffe au coup de feu, s'est tenue entre 100 et 140 kilogrammes. Mais aux allures vives, on a atteint des chiffres de 200 à 240 kilogrammes, même dans un cas 245 kilogrammes, nombre qui ne semble guère devoir être atteint dans aucun cas de la pratique.

« Avec le tirage forcé, la combustion a été beaucoup plus intense qu'avec le tirage naturel. Il est à remarquer au contraire que la vaporisation n'a pas été plus active qu'avec le tirage naturel, le registre étant grand ouvert. Cette circonstance tient peut-être aux rentrées d'air, qui doivent se produire, sous l'effet de la dépression existante, par les joints des portes et par les fissures de la maçonnerie. Lorsque l'on faisait usage du souffleur, le feu était promptement porté au rouge ; aussi l'utilisation du combustible devenait-elle fort médiocre.

« On peut résumer comme il suit les résultats de ces expériences :

« Aux allures ordinaires des générateurs fixes de l'industrie, la vaporisation au coup de feu semble ne pas devoir dépasser 100 à 140 kilogrammes d'eau froide par heure et par mètre carré de surface de chauffe. Il ne paraît pas que, dans aucun cas de la pratique courante, cette vaporisation atteigne le chiffre de 250 kilogrammes. »

M. Stromeyer (*Marine Boiler Management*) en faisant allusion à ces expériences n'attribue pas la diminution de la vaporisation à tirage forcé aux mêmes causes que M. Hirsch, et il critique la valeur de ces expériences : il est d'avis que cette anomalie est due au défaut de circulation de l'eau dans le cylindre isolateur et il fait remarquer que si l'on avait employé dans celui-ci un tube central analogue à celui employé dans les chaudières Field, les résultats eussent été probants.

Nous ne partageons pas cet avis, car M. Hirsch a voulu observer la puissance de vaporisation des tôles de coup de feu des

Digitized by Google

chaudières dans leur fonctionnement industriel : il n'y a pas de chaudière possédant le dispositif suggéré par M. Stromeyer sur ses tôles de coup de feu. A ce point de vue les expériences de M. Hirsch présentent le plus grand intérêt et ont le caractère d'une observation exacte et certaine.

Expériences de M. Durston. — M. Durston (*Transaction of the Institute of Naval Architects*, vol. XXXIV) au cours d'essais entrepris pour constater expérimentalement la température du métal

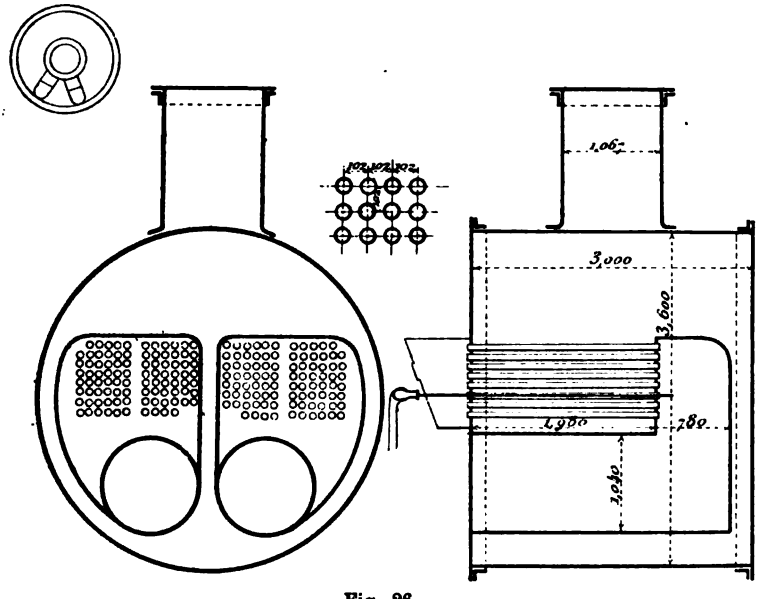


Fig. 26.

dans les générateurs de vapeur a fait des expériences pour déterminer l'abaissement de la température des produits de la combustion à travers les tubes d'une chaudière marine ordinaire employée dans le chantier de Keyham. Ce générateur (fig. 26) avait deux foyers et 166 tubes de retour de flamme, d'un diamètre extérieur de 70 milimètres et d'une longueur totale de $2^m,03$. Les températures furent relevées au moyen du pyromètre thermo-électrique de M. le Chatelier qui passait par la boîte à fumée et le centre des tubes, comme l'indiquent les figures. La température fut relevée de 300 en 300 millimètres jusqu'au voi-

Digitized by Google

sinage de la chambre de combustion, où on la prit de 25 en 25 millimètres. Le générateur fonctionnait normalement avec une consommation de charbon de 83 kilogrammes par mètre carré de grille.

Voici les résultats moyens de huit groupes d'observations :

Température de la chambre de combustion				895°
—	à l'entrée du tube			843
—	dans le tube à 25m/m de la chambre de combustion.			796
—	—	50	—	776
—	—	75	—	763
—	—	100	—	766
—	—	125	—	760
—	—	150	—	763
—	—	175	—	760
—	—	200	—	765
—	—	350	—	742
—	—	500	—	702
—	—	800	—	648
—	—	1120	—	596
—	—	1420	—	546
—	—	1730	—	496
—	—	2030	—	473
—	dans la boite à fumée			417

Ces résultats sont représentés graphiquement par le diagramme figure 27.

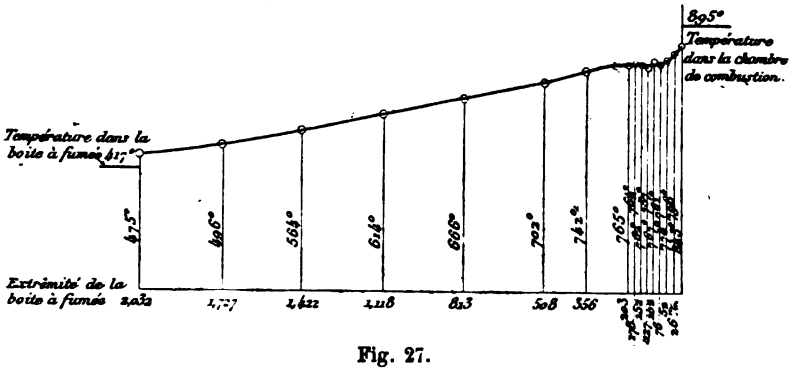


Fig. 27.

On remarquera qu'environ les 2/11es de l'abaissement total de température ont lieu dans les premiers 50 millimètres, après quoi il est régulièrement distribué à travers la longueur du tube.

Digitized by Google

Parmi les autres essais de M. Durston sur lesquels nous reviendrons plus loin, il y a lieu de s'arrêter au tableau qui accompagne la relation de son essai n° 9, qui nous donne les conditions de fonctionnement d'un générateur privé pour ainsi dire de surface de chauffe directe.

Les figures 28 et 29 représentent cette chaudière avec son foyer en briques. Les plaques tubulaires sont boulonnées au cylindre de façon à être facilement enlevées et remplacées. Dans la première série d'essai, un ventilateur chassait l'air à travers le cen-

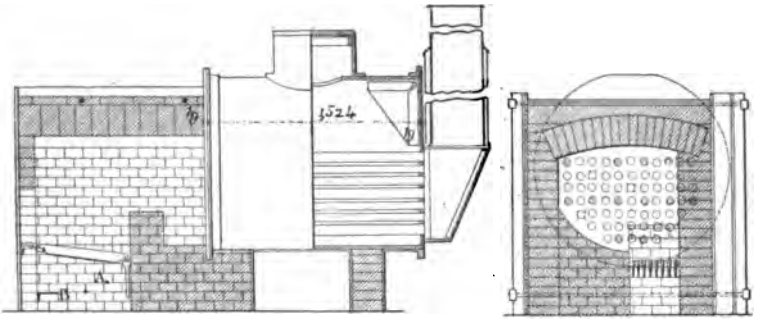


Fig. 28. Fig. 29.

drier fermé et pendant deux heures on travailla dans les conditions indiquées ci-dessous. La température maximum obtenue dans la chambre de combustion était de 1.700° et la température maximum de la vapeur 186°.

	RÉSULTATS	
	Moyens.	Maxima.
Pression de la vapeur	10kg	10k,5
Pression de l'air dans le cendrier clos.	76m/m	127m/m
Température de la chambre de combustion . . .	1560°	1700°
— des tubes (au milieu de leur longueur).	840°	980°
— dans la boîte à fumée	760°	870°
Charbon employé par heure	82kg	
Charbon employé par heure par mètre carré de grille.	146k,4	
Eau vaporisée par heure.	472kg	
Eau vaporisée par heure et par mètre carré de tube et de plaque tubulaire	22k,4	

Avec les dispositions décrites ci-dessus, si on ne cessait pas l'insufflation de l'air par le cendrier au moment de charger le

Digitized by Google

feu, la flamme faisait irruption dans la chaufferie. Pour éviter cet inconvénient la chaudière fut enfermée dans un local hermétiquement clos, dans lequel un ventilateur plus puissant refoulait l'air pour pouvoir ainsi élever l'allure de la combustion.

Voici les résultats de la deuxième série d'essais.

	1er	2e	3e	4e
Durée des essais en heures.	5	5	5	3 5/6
Pression de la vapeur . .	10k,2	10kg	9k,8	10k,12
Pression de l'air.	76m/m	83m/m	76m/m	73m/m
Charbon employé pendant l'essai	1270kg	1449kg	1196kg	relevé imparfait.
Eau évaporée	6420	6715	5976	4670kg
Charbon par mètre carré de grille et par heure .	439	498	411	»
Eau évaporée par mètre carré de tube et plaque tubulaire par heure . .	61k,53	64k,51	56k,38	58k,51
Température dans la chambre de combustion. . .	1510°	1370°	1700°	1760°
Température dans la boîte à fumée.	»	»	870	»

Ces résultats montrent clairement l'importance de la surface de chauffe directe, car quoique dans les conditions des expériences la plaque tubulaire était attaquée par des gaz à très haute température, faute d'absorption dans le foyer, le rendement de la surface tubulaire a été des plus faibles : on voit qu'il n'a pas atteint en moyenne 5 litres d'eau vaporisée par kilogramme de combustible.

Remarques sur les expériences de M. Witz. — Les expériences de M. Witz, pages 40 et suivantes, nous donnent pour la puissance de vaporisation des surfaces de coup de feu, des valeurs qui sont loin d'avoir été atteintes par tous les autres expérimentateurs.

M. Witz a obtenu en expériences continues, et pouvant être poursuivies pendant des heures, une vaporisation de 1000 litres d'eau par mètre carré et par heure.

En comparant les chiffres de vaporisation notés à la page 42, avec les valeurs des quantités de chaleur rayonnante ou de contact absorbées d'après le diagramme de la page 93 et la

Digitized by Google

formule de la page 83 relative à la transmission de la chaleur au travers de la masse d'un corps terminé par deux faces parallèles, nous verrons que dans la cinquième expérience du premier tableau, 433,5 litres d'eau à 19° vaporisée par mètre carré et par heure, la quantité de chaleur transmise par la tôle à l'eau a été de

$$433{,}5\ (606{,}5 + (0{,}305 \times 100)) - (19 \times 433{,}5) = 267\ 903 \text{ calories.}$$

Celles-ci seraient absorbées avec un écart entre la température du foyer (rayonnement et contact) et celle de la tôle, d'un peu plus de 650°.

La face de la tôle en contact avec l'eau étant à 100°, l'écart avec la température de la face extérieure nous est donné théoriquement par la relation

$$Q = \frac{c\,(t - t')}{e} \qquad \text{d'où} \qquad t - t' = \frac{Qe}{c}$$

et pour le cas ci-dessus

$$t - t' = \frac{\dfrac{267903 \times 12}{3600}}{16{,}4} = 54^{\circ}5$$

c'est-à-dire qu'il aurait suffi théoriquement que la face de la tôle du côté du foyer fût à 154°,5 pour que le flux de chaleur nécessaire à l'évaporation de 433,5 litres d'eau à 19° par mètre carré et par heure pût traverser une tôle de fer de 12 millimètres d'épaisseur, la température du foyer étant d'environ 820°.

Mesures expérimentales de la quantité de chaleur émise. — Le tableau suivant donne, d'après différents observateurs, la mesure expérimentale directe des quantités de chaleur émises par des tôles ou des tubes, dont un côté était en contact avec de la vapeur d'eau à une tension supérieure à celle de l'atmosphère, et l'autre côté en contact avec l'atmosphère.

Digitized by Google

MATIÈRE ET CONDITIONS de l'expérience.	DIFFÉRENCES de température.	VAPEUR condensée par mètre carré et par heure.	CALORIES émises par heure et par m.q. pour un écart de 1° et 1m/m d'épaisseur.	NOMS des observateurs.
Chaudière locomotive. . .	100°5	7k,9	514	Isherwood. (*Experimental Researches*, vol. II)
Tôle de fer de 8m/m nue . .	. . . . .	. . . . .	201	Institut Franklin. (Son *Bulletin*, 1878.)
— recouverte de feutre de 6m/m,3 d'épaiss	. . . . .	. . . . .	72	
— 12,7 —	. . . . .	. . . . .	39	
— 19 —	. . . . .	. . . . .	28	
— 25,4 —	. . . . .	. . . . .	21	
— 31,7 —	. . . . .	. . . . .	18,5	
— 38,1 —	. . . . .	. . . . .	17	
Tuyau en fonte nu	125°6	3k,484	326	Walther-Meunier. (*Bulletin de l'Association alsacienne*, 1878-79.)
— fer nu	124°3	3k,906	365	
— cuivre nu. . . .	126°2	3k,816	263	
— fonte recouvert .	115° à 130°	0k,321 à 1k,327		
— fer recouvert . .	116° à 128°	0k,530 à 0k,904		
— cuivre recouvert.	115° à 130°	1k,130 à 2k,866		

Limite de l'étendue des surfaces de chauffe. — En comparant les valeurs ci-dessus à celle du tableau de la page 102 pour l'absorption de la chaleur par les surfaces de chauffe tubulaires, l'on voit que la surface extérieure d'une chaudière émet beaucoup plus de chaleur qu'elle n'en absorbe par la surface tubulaire lorsque l'écart entre les températures des gaz et de la tôle est relativement bas. L'importance de ce fait ne saurait échapper; s'il s'agissait d'un corps de chaudière tubulaire, fonctionnant à 8 kilos de pression dont la circonférence de la calandre est par exemple le dixième de la somme des circonférences des tubes, il n'y aurait aucun avantage, si la chaudière était nue, à envoyer les gaz à la cheminée à une température au-dessous de 400°. Si la chaudière était convenablement recouverte, la température de sortie des gaz pourra être abaissée jusqu'à 100° au-dessus de la température de la chaudière, mais jamais elle ne pourra lui être égale, utopie de nombreux constructeurs peu familiarisés avec les lois de la transmission de la chaleur : ceux qui ont prôné l'échappement des produits de la combustion à une température inférieure à celle de la chaudière sont heureusement très rares.

Des considérations qui précèdent nous pouvons conclure l'inutilité des grandes surfaces de chauffe après le foyer : leur étendue

Digitized by Google

doit être calculée et s'arrêter en deçà de la limite où l'équilibre se produit entre la chaleur absorbée par les surfaces de chauffe et les pertes par rayonnement de la chaudière et de son fourneau : en établissant cette étendue il faudra tenir compte de la nature du métal, de son épaisseur, du but industriel à remplir et faire intervenir le rapport entre le capital immobilisé par une augmentation de la surface de chauffe et les résultats économiques de cette augmentation.

Expériences de MM. Hutton et Yarrow sur la transmission de la chaleur. — M. Hutton (*The Practical Engineer's Handbook*) a fait des essais de transmission de chaleur dont les résultats méritent l'attention. Les quantités de chaleur transmises par mètre carré de surface, par heure, et pour 1 millimètre d'épaisseur avec un écart de température de 1°, l'une des faces chauffée par la vapeur et l'autre en contact avec une quantité d'eau illimitée, seraient les suivantes :

Fonte	4092,4	calories.
Fer	3891,6	—
Acier	3799,0	—
Métal blanc	3196,7	calories.
Bronze	2702,5	—
Bronze à canon	2594,4	—
Bronze phosphoreux	2501,7	—
Cuivre	2393,6	—
Etain en feuille	2191,9	—
Verre en feuille	3999,7	—
Tuiles	3799,0	—

L'examen de ces résultats porte à croire qu'il y a d'autres propriétés que la conductibilité qui interviennent dans la transmission de la chaleur puisque le verre et les tuiles transmettent presque autant que la fonte, et que le cuivre et l'étain paraissent être les moins efficaces.

M. Yarrow (*Transactions of the Institution of naval Architects* vol. XXXII) a fait aussi des essais comparatifs, qui paraissent confirmer les résultats anormaux de M. Hutton. Il a expérimenté sur des tôles de fer et de cuivre chauffées par des becs Bunsen, et il a trouvé que pour les mêmes conditions de chauffe la plaque en fer vaporisait 279 litres d'eau par mètre carré et par heure et que celle de cuivre n'en vaporisait que 156.

Digitized by Google

CHAPITRE VI

TEMPÉRATURES DES SURFACES DE CHAUFFE

Expériences de M. Hirsch. — M. Hirsch (*Expériences sur les coups de feu des chaudières à vapeur*) a réalisé des expériences du plus haut intérêt pour mesurer la température de la surface de la tôle de fer absorbant la chaleur rayonnante du foyer et en contact avec les gaz chauds de la combustion, tandis que les quantités d'eau vaporisée par l'autre face qui était mouillée par le liquide étaient rigoureusement jaugées, ce qui donne la mesure de la quantité de chaleur transmise sous les écarts de température constatés.

Voici le procédé employé pour la mesure de la température de la face chauffée de la tôle.

« On a fait préparer un certain nombre d'alliages, fusibles à des températures graduées et connues. Avec ces alliages, on a formé des chevilles, que l'on a enfoncées dans les trous pratiqués dans la tôle ; la mise en place de ces chevilles étant faite avec un soin convenable, on peut admettre, eu égard à la conductibilité élevée des métaux, que les surfaces isothermes sont à peu près parallèles aux faces de la tôle, autrement dit, qu'en chacune de ses sections transversales, la cheville a la même température que le fer avec lequel le pourtour de cette section est en contact.

« Après chaque expérience de vaporisation, on examine le fond de la chaudière ; un certain nombre de chevilles les plus fusibles sont fondues, les autres sont intactes. On obtient ainsi deux points de repère, plus ou moins voisins, entre lesquels était comprise la température de la face de la tôle exposée au feu pendant l'expé-

Digitized by Google

rience ; car il est clair que cette température était supérieure à la température de fusion de la moins fusible des chevilles fondues, et inférieure à celle de la plus fusible des chevilles intactes. »

Les chevilles étaient disposées au nombre de 24, suivant deux cercles concentriques et placées de sorte que deux chevilles fondant à la même température se trouvaient l'une sur le cercle intérieur, l'autre sur le cercle extérieur, à l'opposé l'une de l'autre; cette précaution a été prise pour atténuer autant que possible les effets des inégalités locales de chauffage. Les alliages étaient au préalable vérifiés.

Voici les résultats des expériences de M. Hirsch, sur une tôle de 10 millimètres d'épaisseur :

QUALITÉ DE L'EAU D'ALIMENTATION	TEMPÉRATURE de la surface chauffée de la tôle.	ÉCART des températures.	QUANTITÉ d'eau à 0° vaporisée par mètre carré et par heure.
Eau distillée	175°	75°	100kg
Id.	187	87	150
Id.	200	100	200
Id.	212	112	250
Id.	222	122	300
Id.	235	135	350
Id.	242	142	370
Eau bouillie avec 2/1000 d'amidon	192	92	100
Id.	202	102	150
Id.	212	112	200
Id.	221	121	250
Id.	231	131	300
Id.	240	140	350
Id.	245	145	370
Eau bouillie avec 5/1000 d'amidon	192	92	100
Id.	202	102	150
Id.	213	113	200
Id.	225	125	250
Id.	236	136	300
Id.	246	146	350
MODIFICATIONS APPORTÉES A L'ÉTAT DE LA TÔLE CHAUFFÉE			
Couche de plâtre de 1m/m interposée sur la face en contact avec l'eau pour simuler les incrustations	202	102	100
Id.	216	116	150
Id.	229	129	200
Couche de plâtre de 5m/m	240	140	140
Id.	267	167	150
Id.	403	303	200
Id.	456	356	220

Digitized by Google

QUALITÉ DE L'EAU D'ALIMENTATION	TEMPÉRATURE de la surface chauffée de la tôle.	ÉCART des températures.	QUANTITÉ d'eau à 0° vaporisée par mètre carré et par heure.
Tôle de 5m/m soudée à l'étain sur celle de 10m/m pour simuler paille ou dédoublement, avec contact intime du métal	237°	137°	130kg
Id.	243	143	150
Id.	260	160	200
Id.	278	178	250
Id.	293	193	300
Tôle de 5m/m appliquée avec interposition de talc pour simuler paille ou dédoublement sans contact intime du métal.	348	248	150
Id.	403	303	200
Id.	459	359	250
Fond chauffé par l'intermédiaire d'un lit interposé de débris de briques réfractaires (tôle en contact avec maçonnerie à haute température)	Mêmes résultats que pour l'eau distillée pure (1re série d'expériences).		
Face en contact avec l'eau, graissée avec de l'huile minérale	221	121	140
Id.	228	128	150
Id.	261	161	200
Id.	295	195	250

Les derniers résultats inscrits au tableau qui précède ne sont pas constants : dans d'autres expériences, les résultats ont été tout différents ; même après un chauffage modéré (vaporisation de 172 kilogrammes), on a trouvé tous les alliages complètement fondus ; ce qui prouve que la température de la tôle avait dépassé 450° sur la majeure partie de son épaisseur.

Ainsi donc, les effets qui résultent du graissage de la tôle se manifestent de deux manières différentes ; tantôt il en résulte une surélévation modérée de la température de la face chauffée ; dans d'autres cas, au contraire, sans même que le feu soit très violent, le métal se surchauffe et atteint des températures fort élevées.

Il était intéressant d'examiner de plus près la question. C'est dans ce but que M. Hirsch a fait les expériences suivantes dans lesquelles comme il ne s'agissait plus de mesures exactes à relever, mais d'une étude qualitative des phénomènes, il s'est contenté de poser sur la gueule du fourneau de simples casseroles en fer battu et étamé, auxquelles on faisait subir diverses préparations.

Digitized by Google

Voici les résultats de quelques-unes de ces expériences :

« Avec des casseroles à fond étamé et propre, quelle que soit l'intensité du feu, l'ébullition est toujours régulière, et l'étain n'est pas fondu sur la face exposée à la flamme.

« Il en est de même quand la face mouillée est désétamée, ou décapée, ou oxydée, soit par l'air humide, soit par l'action prolongée d'une mince couche d'ammoniaque ou d'acide chlorhydrique.

« L'*oléonaphte* appliqué à froid en enduit mince sur un fond étamé, décapé ou oxydé ne donne également qu'une ébullition régulière.

« L'oléonaphte en couche décomposée préalablement par la chaleur donne, au contraire, le coup de feu avec une extrême facilité, ainsi qu'on l'a vu plus haut[1].

« Si l'on pose sur le fond de la casserole un bout de chiffon graissé à l'oléonaphte et maintenu par un poids, on obtient facilement le coup de feu.

« Si dans une casserole dont le fond est oxydé, on fait bouillir une dissolution de sel (chlorure de calcium, de moquérium, etc.), de manière à tapisser les parois d'une mince couche incrustante puis que l'on enduise le fond d'oléonaphte déposé à froid, le coup de feu se produit, même avec un feu modéré.

« L'*huile de lin* produit le coup de feu avec la plus extrême facilité (vaporisation de 100 kilogrammes). Il suffit, pour obtenir le résultat, de toucher le fond de la casserole avec le doigt légèrement graissé à l'huile de lin.

« L'essence de *térébenthine*, le *vernis à l'essence* ne donnent pas de coup de feu. Mais si l'on mélange à l'essence une proportion, même faible (1/10) d'huile de lin, on a un coup de feu.

« Le *mastic de minium* produit le coup de feu avec une extrême facilité. Si l'on a écrasé, sur le fond d'une casserole, une boulette de ce mastic, ou si l'on y a promené le doigt enduit de mastic, un feu modéré suffit pour faire rougir le métal.

« Un enduit d'*huile de colza* produit le coup de feu, mais moins facilement que l'huile de lin.

[1] Voir page 115.

Digitized by Google

« La *valvoline* déposée à froid ne donne le coup de feu que lorsque le jet de chalumeau est extrêmement intense (vaporisation d'environ 350 kilogrammes).

« L'*axonge* donne assez facilement le coup de feu, même lorsqu'elle est mélangée à une quantité notable de plombagine ; si la plombagine est en grand excès, on ne peut plus faire rougir le métal sous l'eau.

« Le *goudron* appliqué sur une surface étamée ou décapée, se détache quand l'eau entre en ébullition.

« Sur une surface oxydée, il reste en partie adhérent, mais ne donne pas de coup de feu.

M. Hirsch énonce enfin les conclusions suivantes :

« 1° Une tôle saine et continue, bien mouillée par l'eau de la chaudière, même exposée à un feu violent, ne prend en aucun de ces points une température assez élevée pour que sa solidité soit sensiblement altérée.

« 2° La viscosité de l'eau, même lorsqu'elle est portée à un degré assez élevé, n'empêche pas la tôle d'être bien mouillée et ne diminue pas notablement le pouvoir réfrigérant du liquide.

« 3° La transmission de la chaleur est plus ou moins gênée par la doublure des tôles ; une rivure, même bien faite, ne doit pas être exposée à un feu trop violent.

« 4° Une paille dans l'épaisseur d'une tôle ou un défaut de contact intime entre les deux tôles d'une clouure, dans les parties du générateur exposée à un feu un peu intense, constituent une cause grave d'accident.

« 5° Le contact d'une maçonnerie réfractaire, même portée à une température élevée, ne présente pas de danger si la tôle est continue et bien mouillée.

« 6° Tout enduit gras déposé sur la paroi interne de la tôle gêne fortement la transmission de la chaleur.

« 7° Lorsque l'enduit gras est constitué par un corps susceptible de se décomposer par la chaleur, le coup de feu est particulièrement à redouter. Les corps gras organiques, huiles de lin, de colza, etc., semblent, à cet égard, beaucoup plus dangereux que les corps gras minéraux.

« Enfin, comme conséquence ultime, on peut déduire de ces

Digitized by Google

expériences qu'une chaudière bien établie, bien tenue, propre et convenablement pleine ne court pas le risque d'être brûlée même par un feu vif ; que, d'autre part, lorsque le feu est ardent, il est nécessaire de prendre des précautions sévères, et notamment d'éloigner avec soin tout ce qui pourrait gêner la transmission de la chaleur, soit dans l'épaisseur du métal, soit entre le métal et l'eau. »

Dans ses expériences, M. Hirsch n'a pas tenu compte de la chaleur spécifique des chevilles : celles-ci exposées au rayonnement du foyer et au contact des gaz chauds, ont atteint leur température de fusion avant que le fer n'ait atteint la même température : les résultats constatés prouvent dans tous les cas que la température de la face chauffée de la tôle n'a pas dépassé celle qui correspondait à la fusion des chevilles non fondues, mais elle a pu ne pas l'atteindre et rester en dessous de celle des chevilles fondues.

Expériences de M. Yarrow. — M. Yarrow (*Transactions of the Institute of Naval Architects*, vol. XXXII) a fait des essais pour déterminer la quantité de chaleur transmise par une tôle, et par la mesure de la dilatation de la face chauffée il en déduisait la température. C'est ainsi qu'une tôle parfaitement plane placée sur un feu de forge, constamment couverte d'eau, se courbait avec un rayon de 550 pouces anglais ($13^{m},970$) c'est-à-dire que la tôle ayant $25^{mm},4$ d'épaisseur, la surface chauffée subissait une dilatation linéaire de 1/735 de sa longueur plus grande que celle de l'autre face, ce qui correspond à un écart de température de 183°C.

Expériences de M. Durston. — M. Durston (*Transactions of the Institute of Naval Architects*, vol. XXXIV), que nous avons déjà cité, a repris cette question et a publié les résultats suivants d'expériences très intéressantes :

1° Une plaque en tôle, à bords relevés, fut montée avec des bouts de tubes en acier (fig. 30) ; le tube du milieu était d'un section plus grande pour permettre de forer des trous horizontaux de $4^{mm},7$, dans l'épaisseur de la tôle. On introduisit dans ces trous des morceaux d'alliages fusibles et on dudgeonna les

Digitized by Google

tubes comme on fait généralement. On remplit ensuite le récipient d'eau, presque jusqu'à hauteur de la courbure, on le plaça sur un feu de forge et avec la soufflerie on éleva la température du feu à 1 100° environ. L'expérience fut poursuivie pendant une demi-heure, de l'eau fraîche étant ajoutée au fur et à mesure pour remplacer l'eau évaporée. On trouva que les alliages, dont les points de fusion montaient à 143° étaient fondus, mais que ceux qui exigeaient 169° étaient restés intacts.

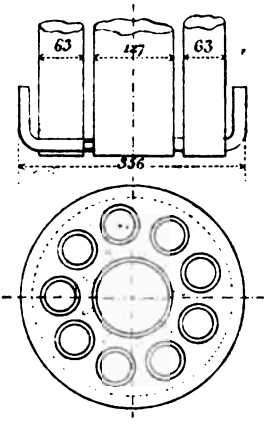


Fig. 30.

2° On construisit une petite chaudière (fig. 31), avec 24 tubes de 63 millimètres de diamètre. Huit de ces tubes étaient en cuivre, sept en acier et neuf en fer. Pour pouvoir constater exactement la manière dont se comportaient les divers matériaux on groupa autant que possible, les tubes par trois — un de chaque espèce pour que l'exposition au feu se fît dans les mêmes conditions. La quantité d'eau introduite dans cette chaudière était calculée de manière à donner, après évaporation complète, une pression intérieure de 7 kilogrammes ; des mesures avaient été prises pour que cette pression ne pût être dépassée.

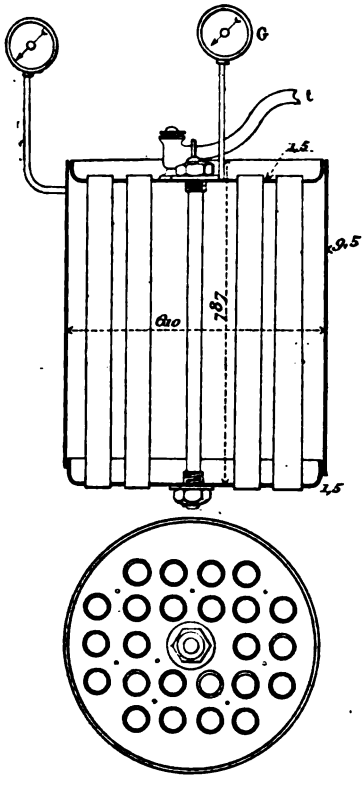


Fig. 31.

La chaudière fut placée sur une forge, les tubes en position verticale, et la soufflerie poussée jusqu'à ce que la plaque portant les tubes eût atteint le rouge correspondant à 760° environ. Au commencement la pression intérieure de la vapeur était de 7 kilogrammes mais elle tomba dès que la plaque

Digitized by Google

fut surchauffée. On enleva alors la chaudière du feu et on la laissa refroidir. En mettant l'appareil sous pression d'eau, on vit que tous les tubes fuyaient démesurément, au point qu'il était impossible d'obtenir une pression quelconque. On ne put constater aucune différence dans la manière dont les tubes en cuivre, en acier et en fer s'étaient comportés.

On fora ensuite jusqu'à mi-épaisseur un certain nombre de trous dans la plaque, et on y introduisit des tampons de plomb, et, dans l'essai suivant, de zinc. La chaudière replacée sur le feu de forge était retirée dès que le plomb ou le zinc fondaient. Dans le premier cas l'étanchéité des tubes, à la presse hydraulique, à 14 kilogrammes fut parfaite : dans le second, les tuyaux en fer seuls étaient étanches.

Pour donner lieu à des fuites appréciables, une plaque d'assemblage de tubes doit donc être portée à une température avoisinant celle du zinc fondant, c'est-à-dire à 400°.

3° M. Durston employa ensuite un fond à bords relevés ayant 610 millimètres de diamètre, une profondeur de 62 millimètres et 6 millimètres d'épaisseur ; le niveau de l'eau fut maintenu constant et le récipient placé sur un feu de forge. Les températures étaient indiquées par des chevilles fusibles.

Avec une ventilation modérée et l'emploi d'eau pure, la température, du côté de la tôle, fut trouvée, comme précédemment, de 115°. On augmenta l'insufflation de l'air et la température de la tôle monta à 138°. On donna une plus grande extension à cette expérience en la répétant avec de l'eau additionnée de diverses substances, et on obtint les résultats suivants :

	TEMPÉRATURE du côté chauffé de la tôle.	TEMPÉRATURE du feu.
	C	C
Eau fraiche et pure	138°	1205°
Huile minérale additionnée graduellement jusqu'à raison de 5 p. 100	154	1258
Eau fraiche avec 2 1/2 p. 100 de paraffine.	166	1150
Eau fraiche avec 2 1/2 p. 100 de méthyline.	149	1370
Dépôt graisseux de 1m/m,5 d'épaisseur sur la tôle : au-dessus de	287	1370

Digitized by Google

4° Afin d'obtenir des températures de l'eau supérieure à 100°, on la fit bouillir en vase clos (fig. 32). On obtint les résultats suivants :

	TEMPÉRATURE du côté chauffé de la tôle.	TEMPÉRATURE de l'eau.	DIFFÉRENCE
a). *Eau claire et surfaces nettes.*			
Au-dessus d'un brûleur Bunsen.	221°	184°	37°
Au-dessus d'un feu de forge à pleine soufflerie	221	174	47
b). *Fond du récipient couvert d'une couche de graisse.*			
Sur un feu de forge. — Couche de graisse, épaisseur 1m/m,5	266	181	85
Sur un feu de forge. — En employant de la graisse d'une nature plus sèche ou plus terreuse.	287	177	110
Sur un feu de forge. — Avec couche de graisse dans le fond et sur les côtés. .	325 [1]	27	298

Une autre série d'expériences fut faite avec le vase clos et démontra qu'à de plus hautes pressions, les excès de température sont constants pour les mêmes conditions.

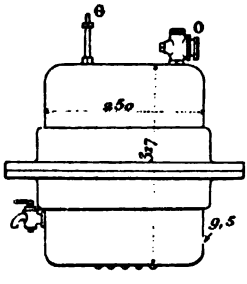


Fig. 32.

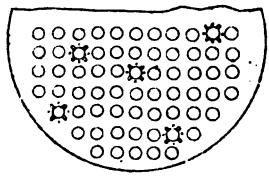


Fig. 33.

La chaudière d'expérience de la page 108 (fig. 28 et 29), a été ensuite disposée pour relever la température du milieu de la tôle :

A cet effet cinq des orifices de la plaque tubulaire (fig. 33) portaient chacun, dans le milieu de l'épaisseur de la paroi, quatre bouchons d'alliage fusible.

Après essai, six pièces d'alliage, dont les points de fusion

[1] Cette température a été obtenue trois minutes après avoir placé le récipient sur la soufflerie.

Digitized by Google

allaient de 224° C à 254°, étaient complètement fondues. Dix, fondant à 282° et au-dessus, sont restées intactes. Deux dont les points de fusion étaient de 260° et 265° sont restées intactes également, tandis que deux autres avec des points de fusion de 271° et 277° avaient leurs bouts proches du tube fondus. M. Durston en conclut que la température de la tôle, au milieu de son épaisseur, ne paraît donc pas s'être élevée à 282°, mais elle a atteint 277° dans quelques-uns des joints tubulaires.

Les essais furent donc continués avec chaufferie close et en sus des alliages fusibles introduits au milieu de l'épaisseur de la plaque, on fixa autour de chacun des tubes 4 tampons de 4 millimètres de longueur et 5 millimètres de diamètre dans la partie antérieure de la plaque (fig. 34).

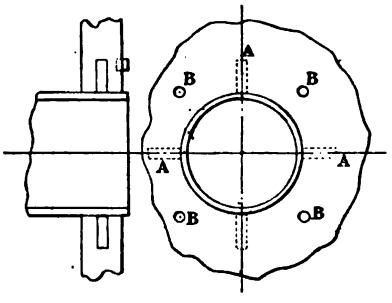


Fig. 34.

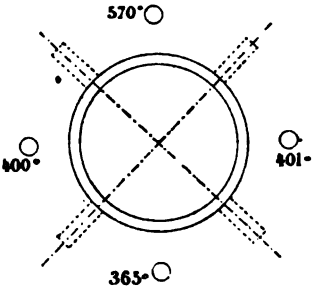


Fig. 35.

Ces petits cylindres faisaient saillies sur la plaque de un peu moins de 1 millimètre. Le tableau de la page 109 rend compte des allures pendant la série des 4 essais qui suivent :

Au premier essai (alimentation avec eau pure) seize tampons, points de fusion de 254° à 365°, fondus et les quatre autres d'antimoine, point de fusion 570°, intacts.

Au deuxième essai, alimentation avec eau pure, les tampons fixés dans la partie antérieure de la plaque autour des cinq tubes étaient, comme l'indique la figure 35, un d'antimoine 570°, deux de zinc 400° et un d'alliage fondant à 365°. De ces tampons, les cinq d'antimoine et trois de zinc demeurèrent intacts; tout le reste fut fondu.

Au troisième essai, on disposa les tampons comme dans l'expérience précédente, et on mélangea à l'eau d'alimentation 4 kilogrammes d'huile minérale. Les cinq antimoines et un zinc sur

Digitized by Google

dix demeurèrent intacts ; les autres furent fondus Cette expérience ayant été la dernière où les tubes restèrent étanches, il convient de noter la température de la plaque comme point de comparaison avec l'expérience suivante. Puisque tous les bouchons de zinc furent fondus (à l'exception d'un fixé dans la partie basse et sur le bord de la plaque), la température de la plaque tubulaire doit avoir dépassé le point de fusion du zinc 400°, sans atteindre celui de l'antimoine 570°.

Au quatrième essai, qui fut une continuation du troisième, on ajouta encore 2 kilogrammes d'huile à l'eau d'alimentation. Pendant cette expérience, on s'aperçut, en nettoyant le feu au bout de 4 heures de marche, que les tubes fuyaient. Les tampons avaient été disposés comme précédemment et à la partie centrale, la plus chaude de la plaque, tous les zincs et les alliages furent fondus ; deux tampons d'antimoine fondirent partiellement.

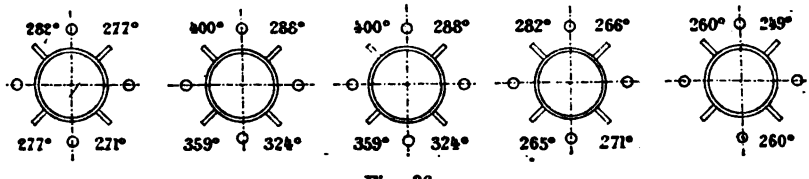


Fig. 36.

La température de la plaque d'assemblage était donc dans les environs de 570°, au moins pendant la dernière période de l'essai et il est à présumer que les tubes commencèrent alors à fuir, car les résultats de la troisième expérience avaient bien prouvé que les tubes restaient étanches jusqu'au point de fusion du zinc, 400°.

On enleva alors les cinq tubes et on examina les alliages fusibles qui avaient été introduits dans le milieu de l'épaisseur. Leur point de fusion variait de 249° à 400° (fig. 36). Ils furent tous trouvés fondus à l'exception des tampons en zinc de deux tubes.

En comparant les températures les plus élevées, atteintes par la partie antérieure de la plaque et au milieu de l'épaisseur voisine des tubes les plus exposés à la chaleur, on trouve :

Température à la partie antérieure de la plaque.	Température au milieu de la plaque.
Antimoine fondu partiellement, c'est-à-dire 570°.	Alliage de 360° fondu, zinc intact, c'est-à-dire entre 360° et 400°.

Digitized by Google

M. Durston dans sa communication rend compte d'autres essais desquels il résulterait que les rentrées d'air froid dans le foyer ne seraient pas aussi préjudiciables qu'on le croit, car celles-ci provoquées à dessein, n'ont pas occasionné de fuites aux tubes ; ce n'est que lorsqu'on a ajouté de l'huile minérale à l'eau d'alimentation, que les fuites aux tubes se sont manifestées. La qualité des tubes, fer ou acier, paraît ne pas avoir d'influence sur la manifestation des fuites, d'où l'on peut conclure que la préférence qui est donnée aux tubes en acier doux est justifiée, car ceux-ci se prêtent mieux au matage.

Remarques sur les expériences de MM. Hirsch et Durston. — Il eût été intéressant de comparer les résultats obtenus par M. Hirsch et M. Durston, si ce dernier avait accompagné ses mesures de températures du jaugeage de l'eau vaporisée par mètre carré et par heure.

Ce renseignement n'est donné que pour quelques expériences seulement, et pour la totalité de la surface de chauffe de la chaudière disposée pour être soustraite au rayonnement de la grille (pages 108 et 109).

L'examen des résultats des expériences de M. Durston qui nous montre que l'excès de température entre le milieu de la tôle et la face mouillée par l'eau était au maximum de 260° — 184° = 76°, donnerait le double, soit 152°, comme écart de température entre les deux faces. D'après M. Hirsch un pareil écart correspondrait à environ 400 litres d'eau à 0° vaporisée à 100° par mètre carré et par heure. Il est toutefois à remarquer que les chevilles fusibles insérées dans l'épaisseur de la plaque étaient en contact par une de leurs extrémités avec la surface du tube et que à cause de leur chaleur spécifique inférieure à celle du fer elles ont pu atteindre leur température de fusion, avant d'être en équilibre de température avec le milieu de la tôle : cela résulte également des observations directes puisque quelques chevilles fondant à 271° et 277° avaient fondu leur bout en contact avec les tubes.

De l'ensemble de ce chapitre et des deux qui précèdent il résulte que les lois qui régissent la transmission de la chaleur

Digitized by Google

au travers des corps solides ne nous sont qu'imparfaitement connues, et qu'il y a lieu de continuer les mesures expérimentales en s'inspirant des travaux déjà faits et en perfectionnant les méthodes d'observation.

Les expériences de M. Hirsch ont montré nettement l'influence des couches intérieures de dépôts sur les surfaces des chaudières en contact avec le liquide : à l'allure de 150 litres d'eau vaporisée par mètre carré et par heure, ce qui est la normale pour les surfaces de coup de feu des appareils industriels, l'écart en excès des températures de la face extérieure de la tôle a été de 116° — 87° = 29° pour une couche de 1 millimètre d'épaisseur, et 167° — 87° = 80° pour une couche de 5 millimètres d'épaisseur : à cette allure l'obstacle qu'offre à la transmission de la chaleur le sulfate de chaux est environ trois fois plus considérable que pour le fer : mais à l'allure de 200 litres ces différences deviennent respectivement 29° et 203°. Pour une couche mince, 1 millimètre, le rapport reste le même, pour une couche plus épaisse, 5 millimètres, il augmente et devient environ 5 fois plus considérable.

En comparant les résultats de M. Hirsch (et les autres de même espèce que nous avons relatés) et ceux de la page 91 nous voyons que pour un même écart de température, la quantité de chaleur transmise par le métal à l'eau par unité de surface est de beaucoup supérieure à celle transmise dans les mêmes conditions à l'air : la différence est tellement grande qu'on peut poser comme principe sans la moindre hésitation que l'eau a le pouvoir d'absorber dans l'unité de temps et de surface une quantité de chaleur beaucoup plus considérable que l'air. Ceci explique pourquoi dans la pratique la puissance de vaporisation des surfaces de coup de feu ne paraît pas être influencée par la nature et l'épaisseur du métal de la paroi, et est encore facilement mis en évidence par l'expérience de physique amusante qui consiste à faire bouillir de l'eau dans du papier, reprise par M. Hirsch dans les conditions suivantes :

« Il n'est pas inutile de rappeler ici certaines expériences bien connues, mais qui ne sont pas sans intérêt et qui démontrent avec quelle rapidité la chaleur se transmet d'une paroi à l'eau

Digitized by Google

qui la mouille. On construit en papier un petit chaudron à fond plat, on le remplit d'eau, on le dispose au-dessus de la flamme d'une bougie ; l'eau ne tarde pas à entrer en ébullition sans que le papier soit altéré.

« Nous avons répété cette expérience sous bien des formes ; nous avons remplacé la flamme de la bougie par celle d'un gros bec Bunsen ou par celle d'un fort chalumeau d'émailleur, qui fondait le verre en quelques instants : le résultat a toujours été le même ; souvent les bords du papier s'enflamment, mais la combustion s'arrête au niveau de l'eau et tout ce qui est mouillé reste intact. Si, entre la flamme et le fond du chaudron, on place une feuille de papier en contact avec ce fond, elle brûle immédiatement, mais le chaudron lui-même n'est pas attaqué.

« Ces faits et les chiffres précédents [1] sont de nature à dissiper bien des craintes sur les conséquences que peut entraîner un feu ardent. Il ne semble pas que, dans la pratique, l'on ait à redouter un coup de feu en pleine tôle, quelle que soit l'activité de la vaporisation, si le métal est sain, bien continu et directement mouillé par l'eau. »

Disposition rationnelle des surfaces de chauffe. — Pour obtenir le maximum d'absorption de chaleur dans un générateur de vapeur, les conditions à remplir sont donc les suivantes :

1° Disposition d'ensemble permettant l'emploi de minces parois métalliques.

2° Emploi de métaux à haute conductibilité, du moins jusqu'à ce que de nouvelles expériences aient confirmé celles de MM. Hutton et Yarrow (page 112) sur la facilité de transmission du fer plus grande que celle du cuivre.

3° Présence constante et effective de l'eau sur les parois chauffées.

4° Surface de chauffe directe disposée pour utiliser tout le rayonnement de la grille.

5° Surface de chauffe indirecte limitée à celle où l'équilibre

[1] Voir page 114.

Digitized by Google

s'établit entre la quantité de chaleur absorbée et celle émise par la surface extérieure correspondante à cette surface de chauffe limite.

6° Foyer à combustion très vive de façon à augmenter les écarts de température.

7° Carneaux longeant les surfaces de chauffe indirecte disposés de façon à diviser les courants gazeux en lames très minces animées d'une grande vitesse.

8° Emploi d'eau distillée pour l'alimentation (eau de condensation par surface, soigneusement débarrassée au préalable de toute trace de matières grasses).

Digitized by Google

CHAPITRE VII

ABSORPTION DE LA CHALEUR PAR L'EAU

Conductibilité des fluides. — Nous savons que les corps fluides (liquides et gazeux) sont tous à l'exception du mercure et moins certainement de l'hydrogène, très mauvais conducteurs de la chaleur.

Rumford admettait que les liquides et les gaz ne possédaient aucun pouvoir conducteur ; M. Despretz (*Annales de Physique et de Chimie*, 2e série, vol. XIX et XXXIV) a réalisé des expériences montrant que les liquides paraissent posséder un pouvoir de conduction réel, mais excessivement faible. Plusieurs autres savants ont étudié cette question ; les résultats de leurs expériences ne sont pas concordants. Voici les coefficients de conductibilité absolue de quelques liquides, mesurés par M. Lundquist (*Traité de Physique de Wüllner*, 3e édition) sans toutefois que l'on puisse considérer ces chiffres comme rigoureusement vrais.

LIQUIDES	DENSITÉ	CONDUCTIBILITÉ absolue.
Solution de sulfate de zinc	1,237	0,00164
	1,252	0,00158
	1,382	0,00158
Eau.	1	0,00155
Eau salée	1,178	0,00149
Acide sulfurique	1,123	0,00150
	1,207	0,00145
	1,372	0,00126

Le professeur Magnus de Berlin (*Annales de Poggendorff*, vol. CXII) a étudié la question de la conductiblité des gaz et il a

Digitized by Google

cru pouvoir conclure de ses résultats que l'hydrogène conduit la chaleur comme un métal. M. Buff (*Annales de Poggendorff*, vol. CLVIII) a repris les expériences de M. Magnus en les mettant à l'abri de quelques causes d'erreur, et n'a plus observé aucun effet appréciable dû à la conductibilité de ce gaz ; les expériences de Magnus doivent donc être considérées comme mettant en évidence non pas la conductibilité mais la grande diathermanéité de l'hydrogène. De nombreux savants ont repris l'étude de la conductibilité des gaz par des méthodes plus perfectionnées, et les résultats des expériences concordent avec les valeurs du coefficient de conductibilité, qui résultent du calcul par application de la théorie mécanique de la chaleur (Clausius, *Annales de Poggendorff*, vol. CXV. Violle, *Journal de Physique*, 1re série, vol. VI).

CONDUCTIBILITÉ ABSOLUE DES GAZ A 0°
ET SOUS LA PRESSION DE 706 m/m

Air	0,000048
Oxygène	0,000049
Azote	0,000047
Oxyde de carbone	0,000048
Acide carbonique	0,000040
Hydrogène	0,000336

Tyndall (*Heat as a mode of motion*, 1892) met en doute tous les résultats relatifs à la conductibilité des liquides et des gaz.

Transmission de la chaleur dans les fluides par convection. — La convection reste donc le seul mode important de transmission de la chaleur par les corps fluides.

Lorsqu'on chauffe un liquide ou un gaz à la partie basse, la diffusion de la chaleur dans sa masse s'opère par courants intérieurs, qui sont provoqués par un phénomène de gravité : les molécules en contact avec la paroi chauffée deviennent moins denses et montent à la surface en transportant avec elles la chaleur absorbée.

Toute cause qui viendrait contrarier ces courants retarde considérablement l'échange des températures, et en s'opposant à la formation de ces courants on empêche la diffusion de la chaleur dans le liquide. Les expériences classiques de Rumford mettent ce fait bien en évidence. Il chauffait les liquides par leur surface

Digitized by Google

libre : il trouva ainsi que la chaleur d'un cylindre chaud en fer, ne pouvait pas traverser de haut en bas une couche d'huile d'olive de 25 millimètres d'épaisseur.

En ayant fait congeler dans deux récipients cylindriques en verre et identiques, un même poids d'eau, il versa à la surface de la glace dans un vase 1 kilogramme d'eau à 100° et dans le deuxième 1 kilogramme d'eau à 0°. Après un temps suffisamment long, il enleva des vases l'eau à l'état liquide et reconnut par des pesées que la quantité de glace liquefiée par le kilogramme d'eau à 100° était la même que par le kilogramme d'eau à zéro degré, et que par conséquent la masse d'eau à 100° n'avait pu échauffer l'eau congelée qui se trouvait au-dessous d'elle. Il rendit cette expérience encore plus frappante en faisant bouillir l'eau sur de la glace dans un récipient en verre, sans faire fondre cette glace.

L'étude des phénomènes relatifs à l'ébullition à l'air libre nous a fait voir que lorsqu'on chauffe de l'eau jusqu'à l'ébullition, la transmission de la chaleur par convection dans la masse du liquide y crée et y maintient, tant que dure l'ébullition, des courants énergiques qui renouvellent rapidement et d'une façon continue les couches en contact avec les surfaces de chauffe. La circulation de l'eau s'établit donc naturellement, en amenant à la surface libre du liquide les bulles de vapeur qui se forment sur la surface de chauffe, et les molécules ayant absorbé une partie de leur chaleur latente de vaporisation. Par ce renouvellement rapide et continu, la température de la surface mouillée de la paroi chauffée devrait être maintenue toujours à la température d'ébullition du liquide. Mais les masses d'eau mises en mouvement par la convection de la chaleur ne glissent pas directement sur les surfaces mouillées des parois chauffées; elles en sont séparées par une couche liquide immobile, qui est pour ainsi dire adhérente aux parois, comme nous l'avons vu page 10. L'eau étant peu diathermane, cette couche, quelque petite qu'elle soit, doit absorber la presque totalité de la chaleur rayonnante émise par la paroi chauffée ; elle peut être le siège de mouvements moléculaires très importants, comparables par exemple à son épaisseur, et dans ce cas elle transmettrait par conductibilité à la masse d'eau la chaleur absorbée et contri-

Digitized by Google

bueraît à l'élévation de la température des deux faces du métal.

Cette couche n'est pas le siège de courants locaux de convection, car les seuls mouvements que l'on y puisse observer sont ceux dus au déplacement occasionné par la formation des bulles de vapeur, qui sont générées aux dépens des molécules d'eau qui la composent.

Influence de la couche immobile. — Dans tous les cas, quelle que soit l'hypothèse que l'on puisse formuler sur ce phénomène, il n'en reste pas moins acquis que cette couche d'eau immobile retarde considérablement la transmission de la chaleur.

Si nous examinons les résultats des très intéressantes expériences de M. Hirsch (p. 114), nous voyons que pour les écarts de température vérifiés entre les deux faces de la tôle, les quantités de chaleur transmises mesurées expérimentalement et celles correspondantes que donne le calcul sont les suivantes :

ÉCART de température.	CALORIES émises par mètre carré et par heure.	ÉCART de température qui aurait dû suffire pour la transmission.	CALORIES qui auraient pu être transmises sous l'écart mesuré aux expériences.
75°	63700	11°	442800
87	95550	17	513548
100	127400	22	590400
112	159250	27	661648
122	191100	33	720688
135	222950	38	797040
142	235690	40	838368

Cet écart considérable n'est dû qu'à la cause que nous venons d'examiner. Lors de ses expériences pour mesurer le coefficient de conductibilité absolue du plomb, Péclet (*Traité de la chaleur*, vol. I) s'aperçut de cette cause d'erreur, qui substituait à la conductibilité du métal celle de la lame d'eau qui lui était immédiatement en contact.

La quantité de chaleur que peut transmettre une plaque métallique est beaucoup plus considérable que celle qu'elle absorbe et émet dans les circonstances ordinaires, car nous avons vu que la nature et l'épaisseur du métal sont sans influence appréciable sur

Digitized by Google

les quantités de chaleur transmises; la circulation très rapide de l'eau sur les surfaces de chauffe a toujours été considérée comme une nécessité dans tous les appareils à vapeur, car en effet la quantité de chaleur qui traverse une plaque métallique, dépendant de la température de la surface d'émission, est liée à la puissance d'absorption du fluide en contact avec celle-ci ; nous savons que l'eau est de tous les corps solides et liquides celui qui absorbe la plus grande quantité de chaleur.

Ainsi quand on ne renouvelle pas la couche immobile de liquide qui mouille les surfaces chauffées, les quantités de chaleur transmises sont beaucoup plus petites que celles qui résultent des expériences, ayant déterminé les coefficients de conductibilité absolue des différents métaux : dans celles-ci les mouvements dus à la convection de la chaleur se produisaient librement, mais en outre des brosses frottaient contre la paroi métallique sur laquelle on expérimentait, et s'opposaient mécaniquement à la formation de cette couche immobile en renouvelant d'une façon continue les molécules liquides en contact immédiat avec le métal.

C'est ainsi que Péclet relate une expérience de MM. Thomas et Laurens, lesquels ont pu évaporer 400 kilogrammes d'eau par heure et par mètre carré de surface métallique formée par un seul tuyau en cuivre de petit diamètre, avec un écart de température de 45°.

Expériences de M. Hagemann. — M. Gustave-Adolphe Hagemann (*Nogle Warmetransmissions Forsog*, Copenhague, 1883) a réalisé une série de remarquables expériences sur la transmission de la chaleur à l'eau lorsque celle-ci est animée d'un mouvement initial, indépendant des mouvements de convection.

L'appareil dont il s'est servi est représenté à la figure 37 : A est un cylindre en fonte de 152 millimètres de diamètre traversé par un tube intérieur en laiton de 49 millimètres de diamètre et 2 millimètres d'épaisseur. Sa longueur entre les fonds sur lesquels il fait joint étanche étant de $0^{m},941$, sa surface est de $0^{m2},1330$. Ce tube est relié à la partie basse à un réservoir D, dont l'eau peut être amenée à différentes températures par un serpentin placé sur le fond et parcouru par de la vapeur. Les

Digitized by Google

deux robinets à valve placés sur la conduite d'amenée de l'eau servent à en régler le débit : à la partie supérieure le tube en laiton est relié à une conduite d'écoulement E, l'extrémité de laquelle est mobile par le manchon *h*, ce qui permet d'amener rapidement le déversement de l'eau, au moment précis du début de chaque expérience, dans le réservoir de jauge placé sur la bascule G. Le cylindre A reçoit de la vapeur d'eau par le tube B et est muni à la partie basse d'un tuyau de décharge et de drainage *c*. Trois thermomètres délicats, *e*,*f*,*f*, sont placés dans l'axe

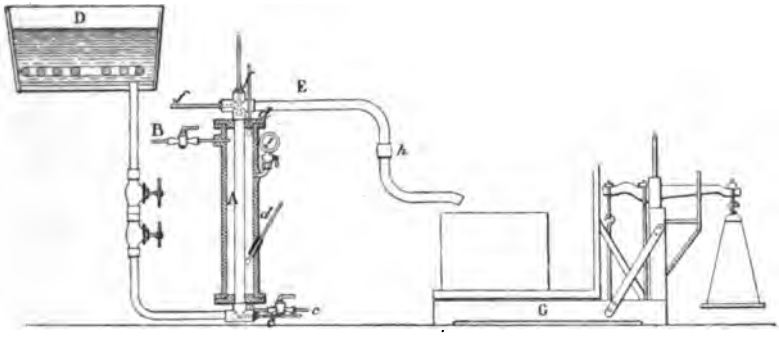


Fig. 37.

de la veine liquide. Deux autres thermomètres *d*,*d*, mesurent la température de la vapeur, et sont contrôlés par un manomètre métallique.

Dans ces conditions, si T est la température de la vapeur, t_1 et t_2 les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie du tube en laiton,

$$T - \frac{t_2 + t_1}{2} = \text{écart de température.}$$

A étant le poids d'eau en kilogrammes s'écoulant en Θ minutes

$$\frac{A}{\Theta}(t_2 - t_1) = \text{calories absorbées en une minute.}$$

$$\left(\frac{2A}{\Theta}\right)\left(\frac{t_2 - t_1}{2T - t_2 - t_1}\right) = \text{calories absorbées par degré d'écart et par minute.}$$

et enfin pour la surface S en mètres carrés

$$\left(\frac{2A}{\Theta}\right)\left(\frac{t_2 - t_1}{2T - t_2 - t_1}\right) : S = \text{calories absorbées par degré d'écart par mètre carré et par minute.}$$

Digitized by Google

Au début des expériences, M. Hagemann remarqua que les indications des deux thermomètres *f,f* n'étaient pas constantes, et que la moyenne d'un grand nombre de relevés était de beaucoup inférieure à la température de l'eau dans le réservoir jaugeur.

En déplaçant les thermomètres et en les rapprochant de la surface de la veine liquide, il constata que l'eau s'écoulait en lames concentriques dont la température allait en croissant du centre à la périphérie : pour supprimer cette cause d'erreur, M. Hagemann plaça un tube intérieur de 38,5 millimètres de diamètre extérieur dans le tube en laiton, en faisant ainsi parcourir à l'eau cet espace annulaire en lame de 3,25 millimètres d'épaisseur. Dans ces conditions les thermomètres *f,f* donnaient des indications constantes et égales à celles du thermomètre plongé dans le réservoir de jauge.

La première série d'expériences fut alors entreprise : elle avait pour but de mesurer la quantité de chaleur absorbée par l'eau en fonction de sa vitesse, pour un écart constant de température, la vapeur étant maintenue à la pression atmosphérique, et le tableau suivant en donne les résultats.

VAPEUR		EAU Températures.			EAU	TEMPS		CALORIES	TEMPÉRATURE		CALORIES	EAU
pression	température	entrée	sortie	différence	kilogrammes	minute	seconde	par minute		écart	1° différence 1 minute 1 mètre carré	vitesse en mètre.
0	100	26,1	70,6	44,5	11,5	5	—	102,4	51,7		14,85	0,092
0	100	25,8	70,7	44,9	11,5	5	—	103,2	51,8			
0	100	32,2	63,7	31,5	17,7	5	—	113,7	52,2		16,05	0,14
0	100	32,2	63,4	31,2	17,5	5	—	109,2	52,2			
0	100	37,0	58,8	21,8	35,2	5	—	153,4	52,1		21,50	0,272
0	100	36,8	58,7	21,9	32,8	5	—	143,6	52,1			
0	100	44,3	56,0	14,7	40,2	2	—	295,4	51,4		42,75	0,792
0	100	41,2	56,0	14,8	39,4	2	—	292,0	51,4			
0	100	41,3	52,9	11,6	46,0	1	30	343,8	52,9		48,8	1,238
0	100	42,8	51,4	8,6	43,4	1	—	374,7	52,7		53,4	1,703
0	100	41,2	50,5	9,3	51,5	1	10	410.4	54,2		56,9	1.726
0	100	50,7	58	7,3	45,2	1	—	331,0	45,7		54,4	1,808

M. Hagemann entreprit ensuite une série d'expériences pour étudier l'influence de l'accroissement des écarts de température

Digitized by Google

pour des vitesses constantes ; il appert de l'examen des tableaux relatifs que la transmission de la chaleur par degré d'écart diminue avec un accroissement de la différence de température, mais il faut ici remarquer que le transport de l'énergie calorifique ne

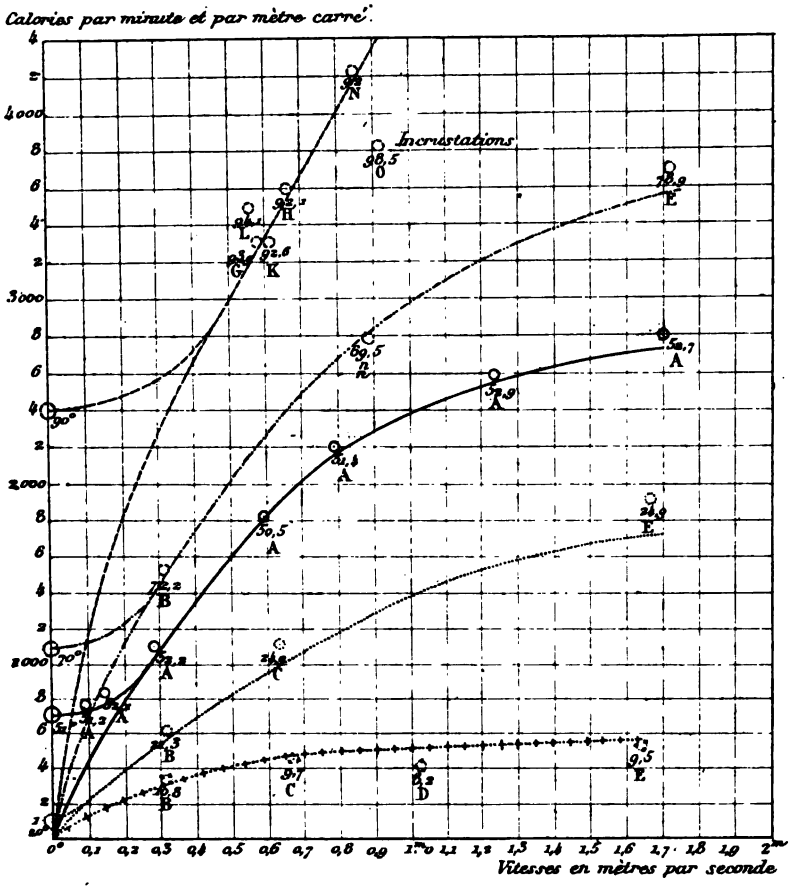


Fig. 38.

s'opérant dans les conditions des expériences que par condensation de la vapeur, la surface du tube était toujours protégée par une couche liquide mauvaise conductrice, et dont l'épaisseur augmentait avec les écarts de températures. Ceci nous indique par analogie, dans le cas des gaz chauds, la nécessité de les diviser en lames minces et de leur donner une grande vitesse d'écoulement.

Digitized by Google

Dans toutes ces séries la quantité de chaleur absorbée par l'eau, dans les mêmes conditions d'expérience, augmente toujours avec la vitesse.

Les résultats de la première série d'expériences, sont représentés graphiquement par la courbe en trait de force du diagramme figure 38, sur lequel les abscisses représentent la vitesse de la lame liquide en mètres par seconde et les ordonnées le nombre de calories absorbées pour 1° de différence de température par mètre carré et par minute. Sur ce diagramme, les petits cercles se rapportent à cette série d'observations et les grands cercles sont empruntés à des séries suivantes : les chiffres placés à côté des cercles indiquent les écarts de température et les lettres la série d'observations.

L'examen de ces courbes indique qu'une vitesse initiale nulle ne correspond pas à une absorption nulle : en effet, les courants de convection qui s'établissent dans la masse liquide renouvellent les couches en contact avec la surface de chauffe, et permettent l'absorption de la chaleur. Une vitesse initiale moindre que celle déterminée par la convection, n'a pas grande influence sur la quantité de chaleur absorbée par le liquide : mais dès que la vitesse initiale dépasse celle qui peut être provoquée par la convection, la quantité de chaleur absorbée augmente considérablement. Toutefois les accroissements ne sont pas proportionnels aux vitesses, et en effet l'influence de la conductibilité du métal doit être d'autant plus marquée que les quantités de chaleur transmises sont plus considérables. En outre dans les conditions des expériences, la lame liquide qui enveloppait la surface de chauffe sur la face absorbante, augmentait avec la quantité de chaleur transmise. On ne saurait tirer de ces courbes aucune loi générale, surtout pour les cas de l'absorption de la chaleur rayonnante où par contact avec les gaz chauds en mouvement, mais elles démontrent l'influence considérable du mouvement initial de l'eau sur la quantité de chaleur qu'elle absorbe.

Digitized by Google

CHAPITRE VIII

CIRCULATION DE L'EAU

Transmission méthodique de la chaleur. — Le renouvellement rapide des couches de liquide qui touchent les surfaces chauffées, a donc une très grande influence sur la transmission de la chaleur, et l'on doit rechercher dans l'établissement des générateurs de vapeur non seulement les dispositions les plus favorables pour faciliter et guider les courants provoqués par la convection de la chaleur, mais aussi l'emploi de tout moyen permettant de s'opposer mécaniquement à la production de la couche immobile sur les parois chauffées.

En principe, toutes les fois qu'il s'agit de faire passer de la chaleur d'un corps en mouvement dans un autre, il est important que ce dernier se meuve en sens contraire ; car à mesure que le corps chaud chemine, il rencontre le corps auquel il doit transmettre sa chaleur à une plus basse température, et la transmission continue, ce qui n'arriverait pas si les corps marchaient dans le même sens, car comme l'un se refroidit et l'autre s'échauffe, leurs températures se rapprocheraient constamment, et la transmission irait en diminuant jusqu'à devenir nulle.

La réalisation de la condition théorique qui précède constitue la transmission méthodique *de la chaleur* et l'on dit alors dans un générateur de vapeur, que le chauffage se fait méthodiquement. Ceci suppose que toute la masse d'eau contenue dans le générateur n'est pas à la même température : le chauffage méthodique aura d'autant plus d'effet, que les différences de température des parties d'une chaudière léchées par les flammes seront plus considérables.

Digitized by Google

Expérience de Williams. — La disposition élémentaire la plus rationnelle d'un appareil à vapeur est donc celle qui canalisera les mouvements créés dans la masse liquide par la convection.

L'action violente et intermittente due au manque de canaux distincts, est rendue bien évidente par l'expérience suivante empruntée à M. Ch. Wye Williams (*La combustion du charbon*).

« La figure 39 représente deux tubes de 2 pouces ($0^m,051$) de largeur chacun, et de 18 pouces ($0^m,457$) de long, A et B, faisant communiquer entre eux deux vases en étain, C et D, placés à chacune de leurs extrémités ; cet appareil est suspendu sur un feu ou sur une série circulaire de jets de gaz produisant une forte chaleur.

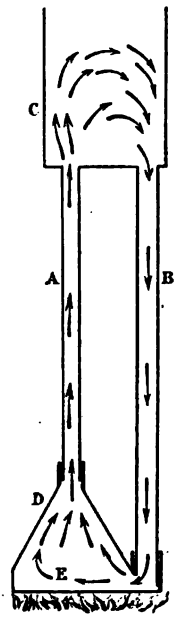


Fig. 39.

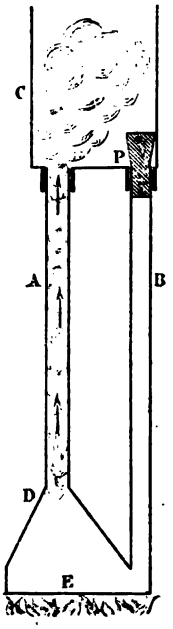


Fig. 40.

« Aussitôt l'application de la chaleur, on verra un courant formé par un mélange de vapeur et d'eau, monter dans l'un des tubes et descendre dans l'autre, suivant la direction des flèches ; il n'y a ni choc, ni confusion ; les choses s'établissent de la manière la plus favorable à la génération de la vapeur, l'eau la plus froide ayant un accès facile et continu vers le fond chauffé du vase E,

« Mais si l'on interrompt la communication entre les deux tubes, en bouchant ou en tamponnant l'un d'eux, comme en P, figure 40, la circulation dans le tube B sera suspendue, et le tube A devra faire un double service, celui de faire parvenir à la surface du niveau la vapeur qui s'élève, et au fond du vase E l'eau descendante. Au lieu d'une production uniforme de vapeur, on aura une action intermittente, composée d'une explosion violente alternant avec un calme comparativement inerte ; mais il est évident que ce der-

Digitized by Google

nier état n'est que l'intervalle pendant lequel s'accumule la force qui est subitement dépensée dans le premier.

« Ainsi, cette vapeur accumulée se détend tout à coup et se dégage avec une grande violence, en vidant littéralement, à la fois, les tubes et la chambre inférieure. Il s'ensuit naturellement une réaction également violente, mais plus soudaine, et une masse considérable d'eau plus froide se précipite immédiatement pour remplir l'espace vide. Il faut ensuite un intervalle de temps suffisant pour élever la température de cette affluence considérable d'eau plus froide, et pour rétablir l'état primitif d'ébullition.

« Cette expérience nous fait donc connaître, sur une petite échelle, une cause physique et naturelle de l'action intermittente qui a lieu, sur une grande échelle, dans les chaudières où la libre circulation est entravée par le manque d'espace convenable. Elle nous apprend également la véritable origine des *ébullitions* ou *projections d'eau* dans les chaudières où l'acte de l'ébullition est violent. »

Expériences de Perkins. — Perkins a réalisé de nombreuses expériences pour prouver combien la vaporisation était facilitée par la canalisation des courants de convection.

Nous trouvons dans la brochure : *La Vapeur*, éditée par la compagnie Babcock et Wilcox, le compte rendu d'une communication faite par M. Georges H. Babcok à Cornell University, en février 1890, dans laquelle cet ingénieur a présenté à son assistance les expériences de Perkins ainsi qu'il suit :

« Lorsque toute l'eau a été chauffée au point d'ébullition correspondant à la pression à laquelle elle est soumise, chaque calorie nouvelle ajoutée convertit une portion de l'eau (un peu moins de deux grammes) en vapeur. Par la vaporisation, le volume s'est largement augmenté et le mélange de la vapeur et de l'eau, s'élevant avec rapidité, produit l'ébullition telle que nous la voyons dans un vase ouvert. Si la quantité de chaleur fournie au liquide est constante et modérée, le phénomène se poursuit dans les mêmes conditions ; montée tumultueuse de l'eau le long des parois, écoulement vers le centre et ici, courant descendant. Si au contraire le feu est activé, les courants montants s'embrouillent

Digitized by Google

avec les courants descendants, et l'eau est projetée hors du vase (fig. 41).

« Plaçons maintenant dans le vase un autre vase plus petit (fig 42), percé dans le fond, et maintenu à une distance convenable des parois du premier ; nous séparons ainsi les courants ascendants des courants descendants, et nous pourrons porter les feux à une très grande intensité, sans produire des projections

Fig. 41.

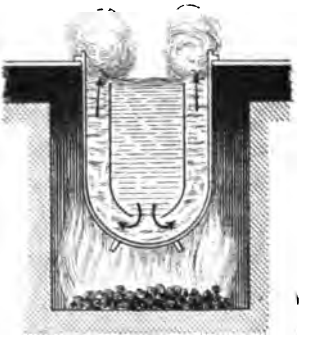


Fig. 42.

d'eau tumultueuses. Mais nous n'arriverons jamais à obtenir le même résultat, si au moyen d'un diaphragme infléchi nous cherchions à diriger le courant ascendant vers le centre. C'est Perkins qui, en 1831, appliqua ce tube intérieur; son invention a depuis servi de base à un très grand nombre de dispositions propres à faciliter la circulation de l'eau dans les chaudières. Le principe réside dans la division des courants, de façon à ce qu'ils ne puissent s'opposer les uns aux autres.

« Dans quel but cherche-t-on à favoriser la circulation de l'eau dans les chaudières ? Pourquoi ne pas s'en rapporter au libre jeu des forces naturelles, comme nous le faisons dans les usages domestiques ? Parce que ce serait n'avoir nul souci des trois points essentiels qu'on doit viser dans la construction des chaudières, savoir : le rendement, la durée et la sécurité ; car chacune de ces qualités dépend plus ou moins d'une bonne circulation de l'eau.

« Au point de vue du rendement, notre vase nous a donné une

Digitized by Google

preuve de l'efficacité de la circulation. Lorsque nous avons maintenu la circulation, il nous a été loisible d'élever la température du foyer, et de faire bouillir l'eau beaucoup plus rapidement qu'auparavant[1]. Il en est de même dans une chaudière. Nous avons pu remarquer encore qu'avant la mise en place du tube intérieur, lorsque la circulation libre était abandonnée à elle-même, la vapeur soulevait l'eau en gros bouillons qui provoquaient l'entraînement mécanique des particules liquides. Quand, au contraire, les courants étaient séparés et qu'une circulation libre s'était établie, tout tumulte cessait, et la vapeur en plus grande quantité se dégageait incomparablement plus sèche. Une bonne circulation accroît ainsi de deux manières le rendement d'une chaudière ; elle active l'admission de la chaleur utilisée à la vaporisation et diminue la tendance à perdre de la chaleur par le phénomène de l'entraînement de l'eau auquel on a donné le nom de *primage*.

« Incidemment, une bonne circulation augmente le rendement des chaudières d'une troisième manière ; elle empêche, d'une façon plus ou moins complète, le dépôt des matières incrustantes.

« C'est ainsi qu'elle contribue encore puissamment à l'efficacité de la surface de chauffe.

« Une bonne circulation maintient la température à peu près uniforme dans toutes les parties de la chaudière, qui se trouve ainsi mise à l'abri des effets pernicieux dus aux dilatations inégales, et la durée de la chaudière est assurée.

« Tout ce qui contribue à la durabilité contribue également à la sécurité. Une chaudière qui n'est pas soumise aux efforts de dilatations et de contractions inégaux, n'est pas seulement moins sujette aux réparations, mais elle est moins exposée aux ruptures et aux explosions désastreuses ; car de beaucoup la cause la plus commune des explosions se trouve dans les excès de tension causés par les dilatations inégales. »

Perkins était le partisan convaincu de l'emploi de la vapeur à haute pression, à une époque où l'on osait à peine aborder des

[1] M. Babcock nous paraît avoir ici confondu la puissance avec le rendement.

Digitized by Google

pressions de 2 ou 3 atmosphères. Son tort a été d'être de beaucoup en avance sur son époque et ses travaux ont été considérés comme de parfaites utopies par ses contemporains.

Parmi les nombreuses expériences qu'il a réalisées nous citerons encore la suivante :

Une chaudière cylindrique, de $1^m,219$ de long sur $0^m,305$ de diamètre, ayant été placée verticalement sur un fourneau, la base fut entourée d'un feu qui s'élevait au tiers de la hauteur, tandis que l'eau plus basse n'en baignait qu'un sixième ; la soupape de sûreté, chargée d'environ 1 atmosphère, était placée sur les côtés de la chaudière, à la moitié de la hauteur. On remplaçait l'eau transformée en vapeur que cette soupape laissait échapper, au fur et à mesure de sa décharge. Un thermomètre, plongé dans l'eau et descendant jusqu'au fond du vase, marquait 104° centigrades. Un autre, plongé au milieu de la hauteur de la chaudière, accusait 260° ; le couvercle de la chaudière était rouge (*Annuaire du Bureau des longitudes* de 1830).

Pouvoirs absorbants de l'eau et de sa vapeur. — Lorsque l'eau est en contact réel avec les tôles, il ne peut y avoir aucun doute sur le maintien de celles-ci à une température qui n'offre aucun danger et qui est comparativement basse, car l'oxydation du fer n'a lieu que lorsqu'il a atteint la chaleur rouge, ce qui ne se produit que si l'eau n'est plus en contact immédiat avec la tôle.

M. C. Wye Williams (*La combustion du charbon*) donne les résultats de nombreuses expériences relatives à la puissance d'absorption des fluides en contact avec une tôle chauffée.

« Le résultat de ces expériences est consigné dans le tableau suivant, qui donne une approximation suffisante de l'efficacité relative des différentes espèces de récepteurs avec lesquels les tôles d'une chaudière peuvent être mises en contact. Soit 1000 calories la quantité de chaleur à transmettre, la partie qui sera absorbée par les récepteurs, dans un temps donné, peut être estimée ainsi qu'il suit :

Digitized by Google

NATURE DES RÉCEPTEURS	QUANTITÉ de chaleur reçue par la tôle.	QUANTITÉ de chaleur transmise par la tôle.	QUANTITÉ de chaleur restant dans la tôle.
Eau.	1 000	1 000	0
Eau et vapeur	1 000	800	200
Vapeur	1 000	600	400
Air.	1 000	400	600

« Ainsi une surface de tôle donnée, après avoir été élevée à la température qui lui est propre, transmettra entièrement les 1000 calories qu'elle recevra, *si le récepteur est l'eau.* La vapeur étant au contraire le récepteur, 600 calories seulement seront absorbées, *400 resteront nécessairement dans la tôle, s'y accumuleront et en augmenteront la température*, en proportion de l'intensité de la flamme.

« De même, si le récepteur est *l'air*, 400 calories seulement seront enlevées à la tôle ; elle en gardera 600 qui s'y accumuleront. Nous apprenons par là comment la faculté d'absorption du récepteur réguralise et contrôle l'action de transmission et la température de la tôle ainsi que le danger auquel cette tôle est exposée, lorsqu'elle est indûment chauffée. Le défaut de dispositions convenables pour la libre circulation de l'eau, et pour la suppression de tous les obstacles qui en gênent l'accès vers la tôle, quel que puisse être en tout temps le récepteur, peut donc être regardé comme la principale, sinon comme la seule cause de la détérioration des tôles par *excès de chaleur*, et cette cause est entièrement indépendante de leur épaisseur ou du degré de chaleur auquel elles peuvent être exposées. Ainsi, la température et la durée des tôles seront *en raison inverse de la rapidité du courant* de chaleur qui les traverse, tandis que ce courant de transmission sera *en raison directe du pouvoir absorbant* du récepteur qu'il soit eau, vapeur, air ou mélange de ces corps. »

La différence considérable qui existe entre les quantités de chaleur absorbée par l'eau ou sa vapeur à la même température n'est due qu'à la chaleur latente de vaporisation que le liquide absorbe pour passer à l'état gazeux, sa température restant la même pendant cette absorption : le flux de chaleur qui traverse

Digitized by Google

le métal est constant, en admettant que l'écart de température entre le foyer ou le gaz chaud et les surfaces de chauffe soit maintenu le même par la combustion qui se continue sur la grille. Dans le cas de la vapeur toute absorption de chaleur correspond à un accroissement de température de la surface d'émission, et par là à une diminution de la quantité de chaleur transmise.

Efficacité de la circulation de l'eau. — La quantité de chaleur transmise à l'eau dans l'unité de temps, par une lame métallique chauffée, est proportionnelle, toutes autres circonstances étant égales, à l'étendue des surfaces de contact, et comme nous avons vu que la quantité de chaleur que transmet une paroi métallique dépend surtout de la puissance d'absorption du liquide qui la baigne, il est évident que la vitesse initiale avec laquelle cheminent les lames liquides, en augmentant la surface de contact, correspond à une augmentation proportionnelle des surfaces métalliques chauffées jusqu'à ce que leur limite de transmission de la chaleur ait été atteinte. Si nous supposons en contact une lame liquide et une surface métallique de 1 mètre carré, nous obtiendrons en une seconde une même surface de contact si la surface métallique n'avait qu'un décimètre carré, et que la lame d'eau fût animée d'une vitesse de 10 mètres par seconde.

Comme la quantité de chaleur qui peut traverser une tôle est, même dans les cas les plus défavorables, incomparablement plus grande que celle qui la traverse réellement, on a vu[1] qu'on peut impunément l'exposer au feu le plus ardent sans que la rapidité de la transmission soit ralentie, à condition que la présence de l'eau soit assurée sur sa face non chauffée. Les surfaces de chauffe des appareils à vapeur peuvent donc être rendues beaucoup plus efficaces par la circulation de l'eau. Nous répéterons ici que ce que nous entendons par circulation, ce n'est pas le mouvement produit dans l'eau en ébullition par la convection, mais bien un mouvement initial de toute la masse d'eau, obtenu par un moyen physique ou mécanique indépendant de la con-

[1] Expériences de M. Hirsch, p. 113; de M. Witz, p. 40.

Digitized by Google

vection. Cette dernière ne produit que des courants giratoires, locaux, qui glissent sur la couche immobile adhérant aux parois tandis que le mouvement initial, indépendant de toute la masse, s'oppose à la formation de cette couche immobile.

M. W. P. Trowbridge (*Heat as a Source of Power*) a fait des essais sur les effets de la circulation forcée : une pompe refoulait de l'eau dans des tuyaux en serpentin formant la chaudière, la reprenant après son passage sur les surfaces de chauffe pour la refouler à nouveau, en créant ainsi une circulation forcée et continue.

Les résultats obtenus au point de vue de la puissance de vaporisation des surfaces de chauffe ont été des plus concluants : malheureusement la dépense et les difficultés de fonctionnement d'une pompe établie pour marcher dans ces conditions, n'en permettent l'application qu'à titre d'expérience.

M. Herreshoff en Amérique et M. Yarrow en Angleterre ont également réalisé des expériences dans des conditions analogues, avec les mêmes résultats.

Les expériences de M. Hagemann (p. 132 et suivantes) ne laissent du reste aucun doute sur les résultats de la circulation forcée ; le moyen à employer pour la provoquer dans des conditions économiques et certaines a seul fait défaut jusqu'ici.

Les effets de la circulation forcée de l'eau dans les générateurs de vapeur sont non seulement d'augmenter dans des proportions considérables, et en raison directe de la vitesse de circulation, la puissance de vaporisation des surfaces de chauffe, mais, en détachant les bulles de vapeur formées sur ces surfaces et en les maintenant constamment en contact avec le liquide, elle empêche toute surchauffe du métal et les conséquences de la surchauffe que nous avons examinées au chapitre II, telles que coup de feu et matelas de vapeur. Elle assure donc également la conservation des tôles, quelle que soit l'intensité du foyer, celles-ci ne pouvant en aucun cas atteindre une température dangereuse, et donne au fonctionnement des générateurs de vapeur une sécurité presque absolue, en éliminant la plupart des causes de destruction auxquelles ces appareils sont exposés.

Digitized by Google

CHAPITRE IX

APPAREILS PRODUISANT LA CIRCULATION DE L'EAU

Aperçu historique. — La nécessité impérieuse d'adopter des mesures d'un effet certain pour provoquer la circulation de l'eau dans les chaudières, afin de supprimer les inconvénients qui résultent des différences de température de la masse liquide, a donné lieu en marine à des recherches continues, qui ont abouti à des résultats permettant de donner une solution au problème. Mais l'idée de provoquer la circulation de l'eau dans les chaudières pour améliorer leur rendement, augmenter leur puissance et perfectionner leur fonctionnement, remonte fort loin, et les premières tentatives dans ce sens paraissent être consignées dans un brevet délivré à M. John Payne, le 15 novembre 1736, pour une chaudière de forme sphérique à l'intérieur de laquelle était placée une espèce de turbine projetant l'eau sur les parois de la partie équatoriale qui était chauffée par les produits de la combustion. Après Payne, il faut sauter presque un siècle entier pour trouver de nouveau des traces de dispositifs destinés à produire une circulation de l'eau dans les chaudières. En 1824, M. Paul fit breveter une chaudière composée essentiellement d'un serpentin, avec une pompe de circulation dont le serpentin constituait le tuyau de refoulement : l'eau pénétrait à la partie haute du serpentin, et devait s'échapper complètement vaporisée par l'extrémité basse, car la chaudière ne comportait pas de réservoir de vapeur : nous retrouvons ici, dans sa forme primitive, le générateur repris depuis quelques années par M. Serpollet, qui en a rendu possible l'application dans certains cas particuliers par les

Digitized by Google

perfectionnements apportés à la construction. Perkins vient ensuite en 1831 avec ses cloisons directrices des courants de convection, lesquelles, reprises par d'autres inventeurs, provoquèrent la création de nombreux types de générateurs à cloisons directrices.

En 1862 M. John Edler fit breveter le dispositif représenté à la figure 43. Une hélice refoulait l'eau au sommet d'un serpentin de grandes dimensions, le mélange d'eau et de vapeur s'échappait par l'ouverture du bas dans un réservoir cylindrique placé verticalement à l'extérieur du fourneau, où se faisait la séparation des deux fluides, la partie haute de ce réservoir servait d'espace de vapeur. C'est le début de l'application des moyens mécaniques auxquels il a fallu avoir inévitablement recours, tous les dispositifs imaginés pour canaliser les courants de convection ayant donné des résultats absolument nuls lorsqu'il s'agissait de mettre en mouvement au moyen de ceux-ci toute la masse d'eau d'un générateur.

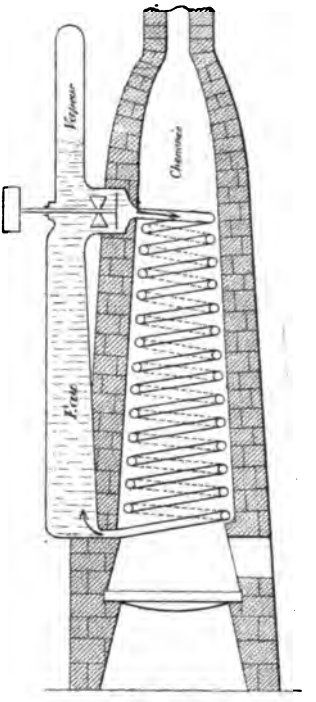


Fig. 43.

Le succès éclatant de l'invention de Giffard stimula le zèle de nombreux inventeurs : la transformation de l'appareil d'alimentation en appareil de circulation fit l'objet de nombreuses demandes de brevets dans tous les pays industriels, et cette application de l'injecteur fut baptisée *Hydrokineter*. Ces appareils se composent essentiellement d'une tuyère dans laquelle s'écoule la vapeur d'une chaudière auxiliaire, et d'une chambre d'aspiration, où débouche une tuyauterie d'eau plus ou moins compliquée, destinée, dans l'esprit des inventeurs, à aspirer l'eau dans des endroits déterminés de la chaudière et à la refouler dans d'autres.

Les expériences entreprises par la marine militaire française aux Ateliers d'Indret ont donné des résultats insuffisants, les

Digitized by Google

différences de température dans les mêmes chaudières mises en pression avec ou sans hydrokineters ayant été sensiblement les mêmes.

On a eu recours alors au simple barbottage de la vapeur d'une chaudière auxiliaire dans la masse d'eau inférieure des générateurs : c'est le système adopté en France par les Messageries Maritimes.

Cette méthode peut donner de bons résultats, à la condition que la quantité de vapeur employée pour le rechauffage soit comparable à la production de la chaudière à rechauffer : le moyen est alors dispendieux, car il oblige à conserver toujours sous pression pour ce service une des grandes chaudières.

Turbine de brassage de M. Garnier. — L'appareil qui paraît donner des résultats satisfaisants pour l'égalisation des températures, c'est la turbine de brassage de M. Garnier, ingénieur aux Établissements d'Indret.

Une petite pompe centrifuge en bronze, munie de son moteur, aspire l'eau chaude dans le voisinage du plan de niveau d'eau pour la refouler dans la partie basse. Les turbines de brassage ont été installées avec plein succès sur plusieurs bâtiments et les résultats obtenus sont certains : la température s'égalise, les enveloppes se dilatent uniformément et pour des chaudières bien construites, on obtient l'étanchéité des assemblages des viroles à la partie inférieure. Des chaudières dont les coutures fuyaient d'une façon inquiétante malgré toutes les précautions prises pour l'allumage, fonctionnent depuis l'adaptation des turbines de M. Garnier dans des conditions normales. Ces appareils ont l'avantage de ne pas nécessiter la mise en pression d'une chaudière auxiliaire, car on peut les virer à la main pendant l'allumage jusqu'à ce qu'on ait atteint une pression de vapeur suffisante pour les actionner.

Il y a en outre intérêt capital à faire fonctionner les turbines de brassage pendant le service, car sans cela la température de la partie basse des chaudières marines tombe progressivement jusqu'à celle de l'eau d'alimentation.

Le débit de ces appareils dépend de leur vitesse à la circon-

Digitized by Google

férence, et des expériences directes ont fait constater que pour un débit de 20 litres par seconde les résistances à vaincre étaient représentées par une colonne d'eau de 4 mètres de hauteur. Voici à titre d'exemple les dimensions principales des turbines de brassage donnant un débit de 20 mètres cubes à l'heure, avec une pression de vapeur de 7 kilos et un nombre de tours de 400 par minute :

Diamètre du cylindre à vapeur	45	millimètres.
Course	40	—
Diamètre de la turbine	280	—

L'application des turbines de circulation n'est pas sans présenter quelques inconvénients : c'est un moteur spécial pour chaque générateur à conduire et surveiller, une dépense supplémentaire de charbon, un appareil très fragile, exigeant un entretien suivi et des réparations fréquentes, et ne pouvant fournir une marche ininterrompue de longue durée.

Émulseur de vapeur de M. Dubiau. — L'importance capitale de la circulation telle que nous l'avons définie, c'est-à-dire le mouvement initial de toute la masse d'eau, ne saurait échapper à personne, et les nombreuses tentatives faites pour la provoquer par tous les ingénieurs ayant étudié l'établissement et le fonctionnement des générateurs, prouvent que c'est là une préoccupation constante, dont la réalisation supprimerait d'emblée tous les inconvénients inhérents aux chaudières actuelles. Il appartenait à M. Paul Dubiau, ingénieur directeur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du sud-est, de résoudre le problème d'une façon aussi simple qu'élégante ; son appareil, dont l'application paraît devoir modifier profondément l'art du chaudronnier, est appelé à rendre des services considérables dans la production de la vapeur d'eau et ses nombreuses applications.

La figure 44 donne la disposition schématique de cet appareil qui assure la circulation de l'eau en contact avec les parois chauffées, par la seule production de vapeur. Il se compose essentiellement d'une cloche, écran ou tout autre dispositif permettant

Digitized by Google

l'accumulation dans un endroit déterminé, en dessous du niveau normal de l'eau, de la vapeur dégagée par la paroi chauffée, et d'un faisceau de tubes traversant cette cloche, débouchant à la partie supérieure du plan d'eau dans l'espace de vapeur A et pénétrant d'une certaine quantité dans l'intérieur de la cloche. Les extrémités des tubes se trouvent toutes dans deux plans parallèles et horizontaux.

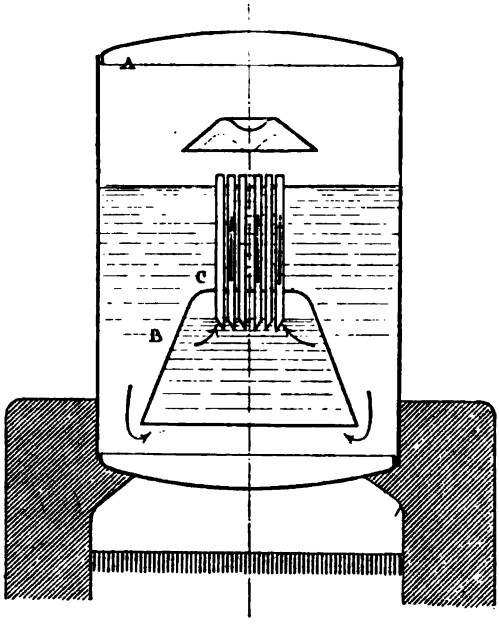


Fig. 44.

Examinons le fonctionnement de ce dispositif. La vapeur produite par la paroi chauffée viendra s'accumuler à la partie supérieure de la cloche B et refoulera l'eau qu'elle contient en élevant le niveau normal supérieur, et en établissant dans la cloche un deuxième plan d'eau, le niveau d'émulsion. Lorsque ce niveau affleure l'ouverture en sifflet des tubes, le mouvement de descente du niveau d'émulsion se continue encore car les deux colonnes d'eau du tube et de la masse du liquide sont en équilibre, et la tension superficielle réunit encore la surface du niveau d'émulsion à l'eau du tube par un ménisque dont la concavité diminue à mesure que le plan d'émulsion baisse.

Digitized by Google

Lorsque l'angle de raccordement atteint une valeur inférieure à celle qui lui permet de faire équilibre à la force élastique de la vapeur, le ménisque se brisera et la colonne d'eau du tube sera isolée de la masse liquide dont la charge sera à ce moment plus grande. La vapeur pénétrera dans le tube, et soulèvera la colonne d'eau qu'il contient, ce qui amènera une montée du plan d'émulsion qui viendra alors de nouveau affleurer les tubes : une bulle de vapeur se trouvera ainsi emprisonnée dans celui-ci, et elle se dégagerait lentement au travers de l'eau si le phénomène s'arrêtait là : mais la production de vapeur continuant, le même ordre de faits se reproduit et une série de bulles vient successivement s'engager dans le tube. Les charges d'eau au plan d'émulsion étant différentes, un mouvement continu ascensionnel s'établira dans les tubes, l'eau et la vapeur qui les traversent se déverseront dans l'espace de vapeur, et l'eau ainsi déversée faisant retour dans la cloche comme l'indiquent les flèches sur la figure, un mouvement continu du liquide, indépendant des courants de convection, sera provoqué par l' « émulseur » tant qu'il y aura production de vapeur.

On a donné à cet appareil le nom d' « émulseur », par analogie avec ce qui se passerait si dans le tube de montée il y avait en réalité formation d'une émulsion stable, c'est-à-dire, d'un liquide moins dense, tandis que au contraire la différence de charge n'est obtenue que par superposition de couches alternées de vapeur et d'eau. Le mot « émulsion » dans ce cas doit être pris dans le sens d'*émulsion instable*.

On peut facilement réaliser un appareil de démonstration pour étudier le phénomène, en disposant deux ballons A et A comme l'indique la figure 45. Un nombre quelconque de petits tubes émulseurs E traversent un bouchon interceptant toute communication entre les deux ballons autrement que par ces mêmes tubes et le retour d'eau R. Dès que l'ébullition se produit dans le ballon inférieur A, le plan d'émulsion s'établit au ras des tubes et un courant continu d'eau et de vapeur se déverse par la partie supérieure des tubes : la circulation de l'eau acquiert bientôt une activité étonnante, et si l'on a mélangé à l'eau du ballon inférieur des particules solides, celles-ci sont entraînées

Digitized by Google

dans le torrent de la circulation et viennent s'accumuler dans le col du ballon supérieur en D où l'absence de tout mouvement du liquide en permet le dépôt.

Avant que le régime normal soit établi dans cet appareil d'expérience, le phénomène se produit par intermittences : l'air ayant été d'abord expulsé, le ballon se remplit complètement d'eau, et lorsque le niveau baisse sous la pression de la vapeur qui s'accumule à la partie haute, l'eau est non seulement déversée dans le ballon A′ par les tubes émulseurs E, mais aussi refoulée par le retour R. Dès que le niveau affleure, les tubes E émulsent, mais aussitôt le courant descendant qui se produit dans le retour R amène de l'eau de la partie supérieure à plus basse température qui arrête l'ébullition et occasionne en même temps la condensation de la vapeur dans l'espace B : le ballon A se remplit alors à nouveau complètement de liquide, jusqu'à ce que, la même série de phénomènes se reproduisant à des intervalles de plus en plus rapprochés, toute la masse d'eau dans les deux ballons ait été amenée à la même température : le régime s'établit alors d'une façon constante tant que le ballon A est chauffé.

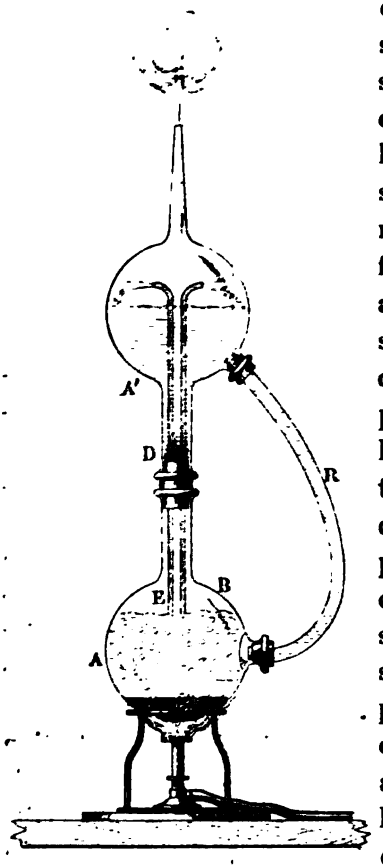


Fig. 45.

Cette intermittence à la mise en train est occasionnée dans l'appareil de laboratoire par la mauvaise conductibilité du verre, la faible étendue de la surface de chauffe, la grande surface de rayonnement, et surtout parce que le volume de l'espace de vapeur B est considérable par rapport à celui de la masse d'eau, environ 1 à 3, ce qui entraîne des variations importantes dans

Digitized by Google

le niveau supérieur lorsque le niveau d'émulsion disparaît ou se rétablit.

Dans les chaudières le phénomène ne s'amorce pas ainsi : l'application de l'émulseur produit au contraire l'égalité de la température de toute la masse d'eau dès l'allumage.

Dans le cas le plus défavorable, celui des chaudières à foyer intérieur, ce résultat est obtenu par une précaution des plus simples : il suffit en effet à la mise en feu de faire affluer le niveau normal de l'eau à l'orifice supérieur des tubes émulseurs : ceux-

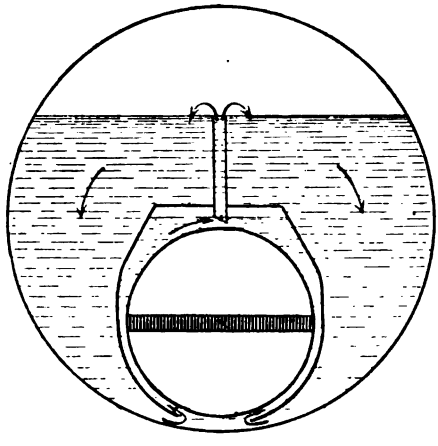


Fig. 46.

ci canalisent les courants de convection qui se produisent sur le foyer et la charge d'eau dans ces tubes devenant moindre, à cause de la plus faible densité, que la charge d'eau extérieure, le liquide contenu dans les tubes s'étale à la surface libre en appelant sur le foyer l'eau des parties basses.

La disposition schématique de la figure 46 montre assez clairement le mode dont s'établit cette circulation de diffusion de la chaleur pour se passer de tout développement. L'affleurement des tubes à la partie supérieure est indispensable pour obtenir ce résultat, car s'ils dépassaient comme dans la marche normale le niveau supérieur, l'équilibre s'établirait avec la montée de l'eau dans les tubes émulseurs et la chaudière s'échaufferait comme dans les conditions ordinaires sans appareil de circulation : un peu avant d'atteindre la pression de fonctionnement on peut,

Digitized by Google

quoique cela ne soit pas nécessaire, faire extraction et ramener le plan de niveau d'eau normal à quelques millimètres en dessous des débouchés des tubes émulseurs. Le fait de ne pas faire extraction n'apporterait toutefois aucun trouble au fonctionnement de l'appareil de circulation et permettrait l'utilisation à la machine du combustible brûlé pour assurer les égalités de température, tandis qu'avec les turbines de brassage, le combustible employé pour provoquer la circulation est dépensé sans récupération.

On conçoit donc qu'on peut facilement à l'aide de l'appareil de M. Dubiau provoquer dans un générateur de vapeur un mouvement initial, intéressant toute la masse d'eau, et donnant une vitesse de translation considérable aux couches qui balayent la chaleur sur les surfaces de chauffe.

Digitized by Google

CHAPITRE X

GÉNÉRALITÉS ET CLASSIFICATIONS DES CHAUDIERES

Conditions d'établissement des chaudières. — Les conditions générales à remplir par un générateur de vapeur sont les suivantes :

1° Résistance très élevée pour s'opposer aux efforts exercés par la pression intérieure de la vapeur.

2° Réduction au minimum de l'usure de l'appareil par son usage.

3° Rendement élevé dans la vaporisation réelle.

4° Économie de construction et d'entretien.

5° Sécurité absolue dans l'usage de l'appareil.

En outre chaque application requiert le dispositif se prêtant le mieux à ses circonstances particulières.

La première condition exige le choix judicieux des matériaux employés à la construction et de la forme la plus appropriée pour soutenir sans déformation ni rupture les efforts auxquels l'appareil sera soumis en service.

La seconde exige l'étude de la nature des matériaux à employer et des transformations qu'ils peuvent subir sous l'influence de la chaleur et des réactions chimiques qui accompagnent la combustion.

L'étude des dispositifs assurant une combustion aussi parfaite que possible et la transmission à l'eau de la plus grande partie de la chaleur dégagée dans le foyer permettra de satisfaire à la troisième condition.

La quatrième condition exige l'emploi du minimum d'appareils

Digitized by Google

accessoires et de matériaux coûteux, et le moins de main-d'œuvre possible, ainsi qu'une disposition d'appareils faciles à visiter intérieurement et extérieurement, le tout bien entendu en harmonie avec les conditions qui précèdent.

La cinquième condition paraît tout d'abord être en antagonisme avec la quatrième : la plus grande économie au point de vue des matériaux consisterait à les ramener à la limite qui supporterait la pression intérieure, alors qu'on ne saurait songer à s'approcher de cette limite sans courir certainement les risques les plus graves. Mais la véritable économie comprenant le fonctionnement continu et certain de l'appareil, et sa grande durée à l'usage, il est évident que la condition de sécurité sera un des facteurs principaux de l'économie.

Les conditions particulières à chaque cas peuvent influencer la forme et le rendement, mais en aucun cas il ne doit être sacrifié à la sécurité, qui dépend non seulement de l'excellence de la matière et de la main-d'œuvre, mais aussi de la conduite judicieuse qui sera faite de l'appareil et des soins incessants dont il devra être l'objet.

Dans la construction d'un générateur de vapeur il faut donc se guider sur les essais de résistance des matériaux, sur les lois de la chaleur, sur les actions chimiques du phénomène de la combustion, sur les transformations de l'état des corps sous l'influence de la chaleur.

Les lois de la résistance des matériaux à la rupture, les meilleures formes aptes à soutenir les efforts, les lois relatives à la force élastique de la vapeur d'eau à différentes températures, et les propriétés de l'eau et de sa vapeur sont suffisamment bien déterminées.

Mais la détermination des meilleurs dispositions d'ensemble d'un générateur de vapeur, et les relations entre la surface de grille, les surfaces de chauffe directe et indirecte, les sections de passage des gaz, les sections et la hauteur des cheminées (conditions qui influent toutes sur le rendement et la production de vapeur) sont loin d'avoir été étudiées à fond et ramenées à des principes généraux universellement acceptés et mis en pratique.

Enfin la plus grande incertitude règne sur les moyens à em-

Digitized by Google

ployer pour obtenir une combustion parfaite, et les lois sur la transmission de la chaleur ne donnent que des indications dont l'approximation permet encore la perte d'énergie quelquefois considérable que l'on rencontre dans les applications industrielles.

Les ingénieurs et les constructeurs de chaudières sont pour la plupart des cas guidés par des règles empiriques mais déduites exclusivement d'observations personnelles ou de leurs prédécesseurs, plus ou moins complètes et exactes.

Ces règles empiriques varient non seulement d'un pays à l'autre et d'un atelier à l'autre d'un même pays, mais parfois dans le personnel d'un même atelier.

En ce qui concerne les formes et l'adaptation aux différents besoins industriels, les résultats de l'expérience ont été plus satisfaisants.

La forme sphérique est celle qui remplit le mieux les conditions théoriques de résistance et de sécurité. C'est la forme que prennent les fluides gazeux enfermés dans une enveloppe extensible, résultant de leur force élastique et d'une pression extérieure uniforme. Un récipient de cette forme a l'énorme avantage de n'être soumis en tous ses points qu'à des efforts à la traction, aucune de ses parties ne travaille au cisaillement, et aucune déformation ne peut y être produite par des variations de pression intérieure.

Mais la forme sphérique n'est pas celle qui convient le mieux aux applications industrielles, ni celle qui peut être le plus facilement construite : elle a donc d'une façon générale été remplacée par la forme cylindrique qui n'est soumise qu'à des efforts à la traction tangentiels et qui permet la plus grande variété de dispositifs pour la transmission de la chaleur. C'est la forme la plus facile à construire, et qui, réalisée théoriquement, se comporte aussi bien sous des pressions extérieures qu'intérieures; elle est par cela même devenue la forme fondamentale de la chaudière. Ce n'est que dans des cas exceptionnels, tels que les foyers des chaudières de locomotives et des boîtes à feu des chaudières marines, que l'on a modifié ou délaissé en partie la forme cylindrique.

Classification des chaudières. — Lorsqu'on parcourt les publications spéciales relatives aux brevets demandés en France, en

Digitized by Google

Angleterre, aux États-Unis d'Amérique, en Allemagne, on constate que le nombre et la variété de dispositifs de chaudières qui ont été imaginés est colossal. L'esprit d'invention a eu dans cette partie de l'industrie un vaste champ pour s'exercer; malheureusement le résultat de cette énorme somme de labeur a été bien maigre, et tous ces dispositifs, bizarres pour la plupart, n'ont pas été réalisés, ou ont dû être abandonnés dès la première réalisation. Il n'est resté que quelques types seulement d'appareils, employés industriellement d'une façon courante et qui pour chaque disposition ont été en pratique l'objet de légères variantes suivant les applications ou les idées du constructeur, ce qui a encore donné lieu à de nombreuses variétés d'un même type.

L'établissement d'une classification générale des chaudières, présente de nombreuse difficultés, et malgré les tentatives faites par des ingénieurs distingués, cette classification n'a pu encore être établie.

L'administration des mines, pour les besoins de ses statistiques et des rapports de service, a adopté la classification suivante :

1° Chaudières chauffées en tout ou en partie a l'extérieur :

A) Horizontales, non tubulaires. . { à foyer extérieur ; à foyer intérieur ;

B) Horizontales, plus ou moins tubulaires . . . . . { à foyer extérieur ; à foyer intérieur ;

C) Verticales;

D) A petits tubes bouilleurs ;

F) Diverses;

2° Chaudières non chauffées a l'extérieur :

A) Locomobiles ;

B) Locomotives ;

C) Établies à demeure. . . . . { horizontales ; verticales ;

D) Diverses.

3° Annexes des chaudières :

A) Réchauffeurs;

B) Surchauffeurs ou sécheurs de vapeur ;

C) Divers.

Digitized by Google

4° Récipients et appareils assimilables.

5° Divers.

D'après cette classification officielle, une même chaudière peut être classée dans l'une ou l'autre de ses deux grandes divisions, suivant son mode d'installation : ainsi la chaudière à foyer intérieur et à faisceau tubulaire de retour de flamme appartiendra à la première subdivision si elle est entourée de maçonneries ou d'une enveloppe formant troisième retour de gaz, à la deuxième si ces maçonneries ou cette enveloppe n'existent pas.

D'un autre côté plusieurs types de chaudières, présentant entre eux les différences les plus caractéristiques, peuvent être groupées dans une même subdivision : c'est ainsi que si une chaudière est montée sur roues, qu'elle soit horizontale ou verticale, tubulaire ou non, à foyer carré, vertical et fixe, ou rond, horizontal, et amovible, à tubes de fumée ou à tube d'eau, elle sera classée dans la subdivision A de la deuxième série.

Un système rationnel pourrait être établi en décomposant une chaudière dans ses éléments constitutifs et en substituant à son appellation celle des éléments qui la composent; une classification de cette espèce serait un peu aride et obligerait souvent à recourir au dictionnaire spécial qu'il faudrait établir, surtout si les appellations étaient représentées par des symboles. Toutefois les difficultés qu'on rencontre pour tomber d'accord sur les dénominations à donner aux éléments constitutifs d'une chaudière sont loin de pouvoir faire adopter un semblable système, quoique, nous le répétons, seul il permettrait la désignation exacte d'une chaudière quelconque ; en supprimant toute classification, il supprimerait radicalement les difficultés auxquelles on se heurte lorsqu'on veut en établir une.

Pour les besoins de notre examen, et sans que nous voulions par là établir une classification quelconque, nous ramènerons les principaux types de générateurs actuellement employés dans l'industrie, aux trois catégories suivantes :

1° *Chaudières à foyer extérieur*, dans lesquelles le fourneau où se produit la combustion est formé en partie par les parois des maçonneries qui enveloppent la chaudière.

2° *Chaudières à foyer intérieur*, dans lesquelles le fourneau où

Digitized by Google

se produit la combustion est formé par des parois métalliques placées au sein de la masse d'eau contenue dans le générateur.

3° *Chaudières à tubes d'eau*, communément mais improprement dénommées *multitubulaires*, dans lesquelles les surfaces de chauffe sont principalement formées par des tubes soudés ou étirés, chauffés extérieurement.

Digitized by Google

CHAPITRE XI

LES CHAUDIÈRES A FOYER EXTÉRIEUR

Chaudière cylindrique simple. — Ce générateur (fig. 47) se compose exclusivement d'un corps cylindrique, généralement surmonté d'une petite chambre cylindrique verticale appelée le dôme de vapeur, portant les tubulures pour les appareils de sûreté et

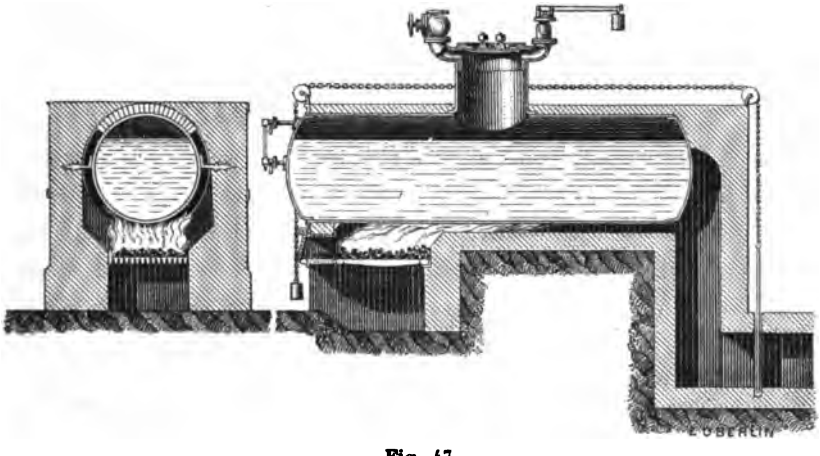


Fig. 47.

les raccordements aux conduites de vapeur. La grille se trouve placée à l'une des extrémités et les gaz chauds en sortant du foyer cheminent sur toute sa longueur. Le carneau de fumée n'a parfois qu'un parcours pour se rendre à la cheminée, parfois trois parcours.

La construction et l'installation de la chaudière cylindrique simple exige une très grande longueur pour une surface de chauffe

Digitized by Google

donnée, et l'emplacement occupé ainsi que le coût du massif de maçonnerie deviennent considérables. Le rendement de cette chaudière est très faible, surtout si les carneaux de fumée ont une section suffisante pour obvier à l'inconvénient de leur encombrement par les suies et les matières entraînées. Si au contraire la section des carneaux est seulement suffisante pour le tirage, comme dans la figure 47, ils s'obstruent rapidement. Ses seuls avantages sont la simplicité et le bon marché de la construction de la partie métallique, et la grande facilité qu'elle offre pour les visites et nettoyages intérieurs.

La figure 48 représente une autre disposition de chaudière à

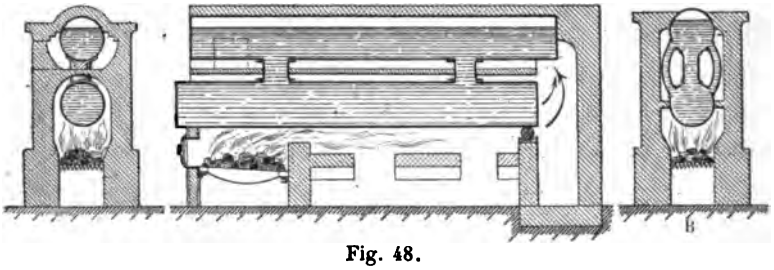


Fig. 48.

foyer extérieur et à circulation de gaz complètement extérieure ; la chaudière se compose de deux corps cylindriques égaux, placés l'un au-dessus de l'autre. Parfois aussi le corps supérieur est plus gros que l'inférieur. Ces corps sont réunis par deux ou un plus grand nombre de communications ou cuissards : M. Bède en Belgique pensa il y a longtemps l'améliorer par l'adjonction de tuyaux de retour auxiliaires, comme en B de la figure.

Chaudières à corps cylindrique et tube carneaux de retour. — La figure 49 représente une disposition souvent employée en Amérique. Les produits de la combustion parcourent d'abord la partie inférieure du corps cylindrique, reviennent en avant dans un tube central raccordé à la cheminée, comme dans la coupe longitudinale, ou retournent à l'arrière par les deux côtés de la chaudière, comme dans la coupe transversale.

Par cette disposition on augmente la surface de chauffe pour une longueur donnée de la chaudière ; les surfaces sont mieux utilisées, et le tuyau central sert dans ce cas d'armature pour

Digitized by Google

maintenir les deux fonds. Mais lorsqu'il y a trois parcours, il est difficile de répartir également les produits de la combustion dans les carneaux latéraux ; presque toujours la vitesse est plus

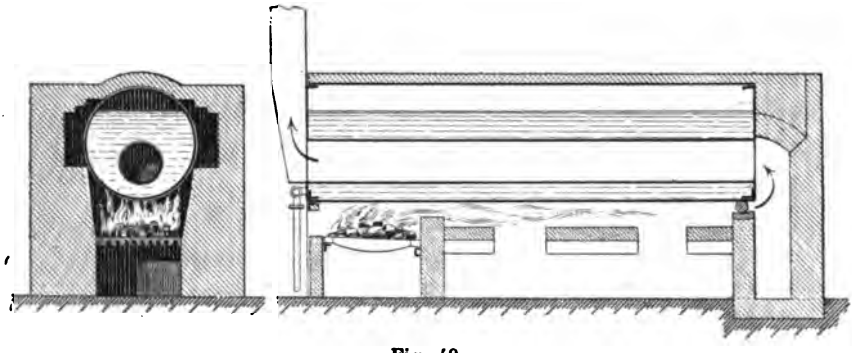


Fig. 49.

grande dans l'un que dans l'autre, et si les carneaux sont plus grands, un seul est parcouru.

Dans la figure 50, l'appareil est composé de deux chaudières, semblables à celle de la figure 49, et qui communiquent entre elles à la partie supérieure pour la vapeur et à la partie inférieure à l'arrière. ou à l'avant, pour l'eau. Les produits de la combustion reviennent à l'avant par les tuyaux placés dans l'intérieur des chaudières, et retournent à la cheminée par les carneaux latéraux. Cette disposition fait produire un plus grand effet utile aux surfaces de chauffe qui sont au-dessus du foyer, et permet d'employer pour une même surface de chauffe des tôles moins épaisses, parce que les diamètres des cylindres sont plus petits.

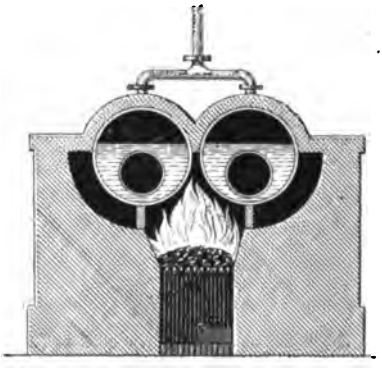


Fig. 50.

Chaudières cylindriques simples, à réchauffeurs. — On a appliqué différentes dispositions pour utiliser au chauffage de l'eau d'alimentation une partie de la chaleur renfermée dans les gaz chauds qui quittent la chaudière, sans toutefois abaisser

Digitized by Google

assez la température pour que le tirage puisse en souffrir. La figure 51 représente une de ces dispositions assez fréquemment employée en France et en Belgique. Les gaz du foyer, après avoir chauffé la chaudière sur toute sa longueur, descendent dans un carneau placé au niveau du sol, et dans lequel se trouvent un ou deux corps inférieurs parallèles. La fumée se rend ensuite à la cheminée par un troisième carneau placé au-dessous, ainsi que l'indique la figure. Lorsqu'un seul corps inférieur ou réchauffeur

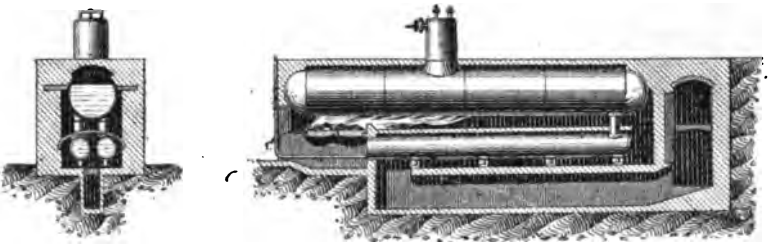


Fig. 51.

est placé dans le carneau de retour, la chaudière est plus spécialement dénommée *chaudière à flammes renversées*. Parfois on a placé un second étage de corps réchauffeurs, dans un troisième carneau. Les réchauffeurs, légèrement inclinés pour faciliter le dégagement de la vapeur et de l'air, viennent déboucher dans le cendrier ; l'alimentation se fait dans les réchauffeurs, du côté où la fumée est le plus refroidie ; les gaz se meuvent donc en sens inverse de l'eau. Cette disposition, qui a l'inconvénient d'exposer le corps de chaudière à l'action directe du foyer, présente les inconvénients des réchauffeurs que nous examinerons plus loin et nécessite de plus la construction d'un troisième carneau, à une certaine profondeur dans le sol.

La figure 52 montre une disposition de la chaudière à réchauffeurs Farcot. Le corps principal est placé directement au-dessus du foyer. Les gaz brûlés circulent tout autour avec une faible vitesse à cause de la grande section des carneaux, et parcourent ensuite en descendant une série de galeries superposées, dans lesquelles sont placés des réchauffeurs communiquant entre eux, comme l'indique la figure. L'eau d'alimentation arrive dans le corps inférieur, de sorte que son mouvement se produit,

Digitized by Google

en sens inverse de la fumée. Les réchauffeurs sont légèrement inclinés, afin de faciliter le dégagement de la vapeur et de l'air, jusqu'au tube placé en dessus. Un tuyau qui met en communication la partie supérieure de ce dernier tube avec le bas du corps cylindrique, sert à introduire à la fois dans la chaudière l'eau d'alimentation et la vapeur qui a pu se former dans les réchauffeurs. Cette disposition, qui exige beaucoup de place et une très grande surface de chauffe pour une production de vapeur déter-

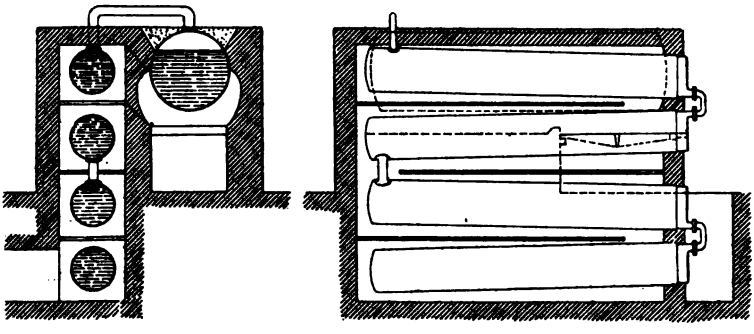


Fig. 52.

minée, a en outre l'inconvénient d'exposer le corps principal de la chaudière au contact de la flamme.

Fonctionnement des chaudières cylindriques simples. — Au point de vue de la vaporisation les chaudières cylindriques simples présentent un grand avantage, c'est d'avoir une grande surface libre d'évaporation, et de ne pas trop s'opposer à la régularité des courants de convection. Mais il y a absence totale de mouvement initial de l'eau, c'est-à-dire de circulation. La couche immobile des parois de coup de feu s'y produit inévitablement, ce qui entraîne la formation facile de dépôts adhérents et des matelas de vapeur, avec toutes leurs conséquences. Pour ces raisons les tôles exposées au rayonnement du foyer se surchauffent parfois et l'on y constate des coups de feu, quoique le niveau de l'eau dans le générateur ait été constamment tenu à la hauteur normale.

La disposition de la figure 49 facilite un peu la direction des courants de convection, mais n'apporte aucun remède aux autres

Digitized by Google

inconvénients. Celle de la figure 48 est absolument défectueuse, car elle supprime le seul avantage de la chaudière cylindrique simple, grand rapport entre la surface de chauffe et la surface libre d'évaporation : elle fonctionne en réalité comme une chaudière à bouilleurs, et participe aux inconvénients que nous examinerons plus loin en parlant de ce type de chaudière.

Le dispositif de la figure 50 a comme avantages de diriger d'une façon parfaite les courants de convection et d'offrir une très grande surface libre d'évaporation.

Dans les chaudières à réchauffeurs (fig. 51 et 52), l'utilisation du combustible est meilleure que dans tous les autres dispositifs de chaudières cylindriques simples : les réchauffeurs permettent un plus grand refroidissement de la fumée, jusque vers 250 à 200°. Ils présentent l'avantage d'éviter en partie les dépôts et les incrustations dans le corps principal de la chaudière : la précipitation des sels commence à se produire dans les réchauffeurs qui sont bien moins sujets à se brûler puisqu'ils sont en contact avec la fumée déjà refroidie.

Corrosions des réchauffeurs. — M. Scheurer-Kestner a étudié les altérations spéciales auxquelles sont soumis les réchauffeurs en tôle (*Bulletin de la Société de Mulhouse*, 1871).

Ces altérations sont de deux sortes et sont dues à deux causes différentes suivant qu'elles se produisent à l'intérieur ou à l'extérieur du réchauffeur.

Dans la corrosion intérieure, le fer se rouille ; l'oxygène est fourni par l'air que l'eau tient en dissolution et cette oxydation est favorisée par la présence de l'acide carbonique ; après quelques mois, l'intérieur de la chaudière, surtout à la tête des rivets, est revêtu d'une poudre formée d'un mélange de carbonate et d'oxyde de fer. On comprend facilement que cette altération se produit bien plus lentement dans les chaudières où l'ébullition immédiate chasse la plus grande partie de l'oxygène. Les eaux calcaires aussi provoquent une oxydation plus lente.

La corrosion extérieure provient de l'action des produits acides de la combustion sur le métal ; tant qu'il n'y a pas de condensa-

Digitized by Google

tion de l'eau qui contient la fumée, l'action est nulle ou à peu près ; aussi les gaz chauds n'agissent pas sur les chaudières ou les bouilleurs d'une façon sensible. Mais sur les parties froides des réchauffeurs l'eau se condense en dissolvant l'acide sulfureux qui passe à l'état d'acide sulfurique et attaque le fer.

Le dernier réchauffeur en communication avec la chaudière se détériore aussi très rapidement lorsque la production de vapeur permet la surchauffe de la partie supérieure.

M. Olry, ingénieur en chef des mines, a publié une étude sur les corrosions intérieures des chaudières et des réchauffeurs, dont on trouvera le résumé dans la *Revue Industrielle* du 15 septembre 1894.

Chaudières à bouilleurs. — Ce type de générateur (fig. 53) est celui qui se rencontre le plus souvent en France. Il se compose d'un grand corps cylindrique surmontant un, deux ou trois

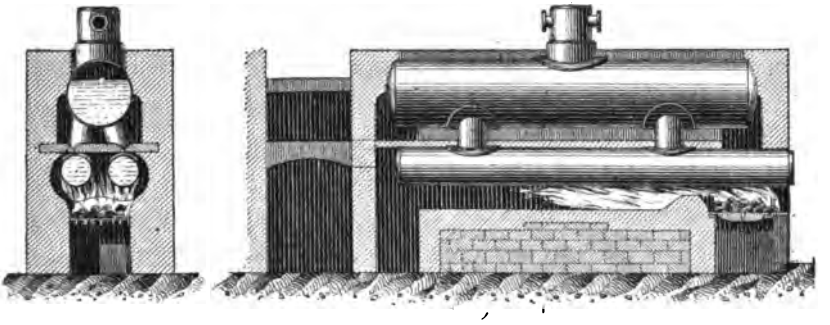


Fig. 53.

autres corps cylindriques plus petits, appelés bouilleurs, qui reçoivent seuls à leur partie antérieure le rayonnement du foyer et qui sont réunis au corps principal par deux ou plusieurs cuissards. Les gaz chauds après avoir cheminé à l'arrière le long des bouilleurs, reviennent à l'avant en parcourant l'un des côtés du corps principal et retournent symétriquement à l'arrière. Sur une même longueur cet appareil donne une surface de chauffe beaucoup plus grande que la chaudière cylindrique simple, et présente l'avantage de n'exposer aux coups de feu que les bouilleurs, c'est-à-dire des cylindres d'un diamètre relativement réduit et

Digitized by Google

conséquemment de faible épaisseur, ce qui diminue les frais de réparation. Le corps cylindrique principal, étant soumis seulement à la chaleur de contact des gaz chauds, a une très grande durée et ne se détériore pas aussi facilement.

Fonctionnement des chaudières à bouilleurs. — Dans la chaudière à bouilleur l'on suppose que la vapeur et l'eau qu'elle entraîne se dégagent avec facilité par le cuissard d'avant, et qu'un double courant continu s'établit, l'un de montée par le cuissard d'avant et l'autre descendant par le cuissard d'arrière, créant ainsi une circulation effective de l'eau dans le bouilleur. Afin de favoriser encore cette circulation on dispose le bouilleur avec une pente vers la partie arrière, et parfois le cuissard d'avant est placé au sommet de deux pentes opposées données au bouilleur. Malgré toutes ces précautions, les bouilleurs se cintrent inévitablement, la concavité vers le sol, et viennent exercer par cette déformation des efforts considérables sur le corps cylindrique principal et les cuissards. Ceux-ci, au début de la construction de ce type d'appareil, étaient en fonte pour ménager des joints à emboîtement, et donnaient fréquemment lieu à des fuites, ce qui les a fait entièrement abandonner.

Le cintrage des bouilleurs est expliqué par une différence de dilatation entre ceux-ci et le corps principal auquel ils sont rigidement reliés par les cuissards : aussi a-t-on conseillé de les rapprocher et même de placer les deux communications sur la même virole : mais cela sans résultat, car le cintrage, ainsi que nous allons le voir, est uniquement provoqué par une plus grande dilatation de la génératrice supérieure du bouilleur, chauffée plus que la génératrice inférieure.

M. Paul Dubiau, Ingénieur Directeur de l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur du Sud-Est, a eu l'occasion, aux cours de ses recherches sur les moyens d'augmenter la circulation de l'eau dans les chaudières, de constater expérimentalement un phénomène frappant qui se produit dans *toutes* les chaudières à bouilleurs, quels que soient la disposition, le nombre et le diamètre des cuissards.

Il a placé un indicateur de niveau d'eau sur la tête du bouil-

Digitized by Google

leur d'une chaudière de 20 mètres carrés de surface de chauffe, inscrite sous le numéro 37 à son Association et qui est représentée en coupe sur la figure 54. Le timbre de cette chaudière est de 5 kilogrammes et la production de vapeur de 300 kilogrammes à l'heure. On peut sans exagération attribuer au bouilleur seul les deux tiers de la vaporisation totale, soit 200 kilogrammes à l'heure,

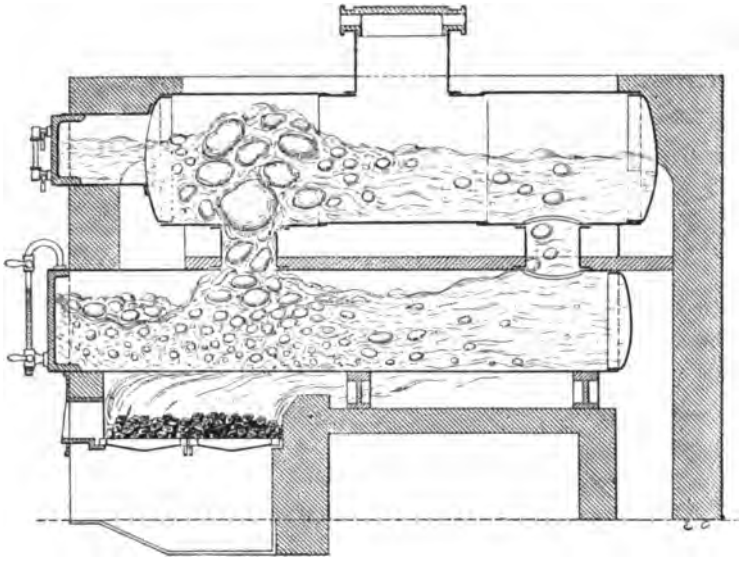


Fig. 54.

et le volume de vapeur qui doit passer par le cuissard avant, de 429 millimètres de diamètre, est de 17,25 litres par seconde.

M. Dubiau qui croyait avoir besoin de l'occlusion des cuissards pour déterminer un plan de niveau d'eau dans le bouilleur, fut fort surpris de voir que sur sa chaudière d'expérience celui-ci s'établissait normalement et d'une façon permanente. Pour que ce plan de niveau d'eau s'établît, il fallait donc que le cuissard mettant en communication le bouilleur avec le corps principal créât un obstacle considérable au dégagement de la vapeur produite dans le bouilleur. Il se passe évidemment dans une chaudière de ce type le même phénomène que nous avons observé dans l'appareil de laboratoire décrit page 12. Toutes les bulles de vapeur montent à la partie supérieure du bouilleur, et comme celles qui ne se dégagent pas juste en dessous de l'ou-

Digitized by Google

verture du cuissard ne peuvent y pénétrer qu'en cheminant horizontalement, ce qui est impossible, elles s'accumulent en refoulant l'eau du bouilleur par le cuissard arrière jusqu'à ce que la hauteur de la colonne de vapeur qui se trouve dans le bouilleur soit suffisante pour la laisser s'engager dans le cuissard, où il passe ainsi par saccades de véritables ballons de vapeur, de grand diamètre. Ceux-ci en se dégageant à la surface libre produisent des soubresauts très violents dans toute la masse d'eau, et occasionnent les oscillations qu'on remarque sur les indicateurs de niveau à tubes de verre placés directement sur le corps principal, oscillations que nous avons eu soin de mesurer et qui atteignent souvent 100 millimètres de dénivellation.

Puisqu'il y a surface de niveau d'eau dans les bouilleurs, il est évident qu'il n'y a pas dans une chaudière de ce type circulation d'eau, c'est-à-dire que le renouvellement de l'eau dans le bouilleur se limite à peu près au remplacement de celle qui est vaporisée, et de celle qui disparaît du bouilleur par les projections.

M. Dubiau fit ensuite des observations analogues en plaçant des indicateurs de niveau sur d'autres générateurs du type à bouilleur : il constata ainsi la présence du plan de niveau d'eau dans tous les bouilleurs, qu'ils soient courts ou longs, que les cuissards soient au nombre de 2 ou 3 par bouilleur. Il résulte de l'ensemble de ses observations que la flèche de l'espace occupé par la vapeur est d'environ 50 millimètres pour une charge d'eau de 1 mètre dans le corps principal : si celle-ci augmente, le plan de niveau d'eau accusé par le tube indicateur du bouilleur baisse de 10 millimètres par 100 millimètres de charge d'eau supplémentaire.

Ce qui précède ne doit pas être confondu avec les poches gazeuses dont on constate la présence dans l'intérieur des bouilleurs, et que l'on désigne sous le nom de ciels d'air. Il n'en est pas moins vrai que le rafraîchissement des tôles supérieures des bouilleurs ne peut s'effectuer que par les seules projections d'eau dues à une ébullition tumultueuse, ce qui est absolument insuffisant et explique le cintrage des bouilleurs.

Il résulte de ce qui précède que toutes les chaudières à bouilleurs installées sans que le quart environ de la surface à la partie

Digitized by Google

supérieure des bouilleurs soit protégé du contact des flammes par de la maçonnerie, sont en contravention avec l'article 10 de la loi de 1880 sur les générateurs et autres appareils à vapeur, et que pour réaliser les 6 centimètres réglementaires, cette protection devrait s'étendre dans la plupart des cas au tiers de la surface des bouilleurs.

Fausses indications des tubes de niveau raccordés aux bouilleurs. — MM. Lethuillier et Pinel, constructeurs à Rouen, ont publié (*Revue industrielle*, mai 1893) les résultats d'observations faites par eux sur les indications simultanées et anormales des plusieurs indicateurs de niveau, montés sur une chaudière à bouilleurs, comme le représente la figure 55.

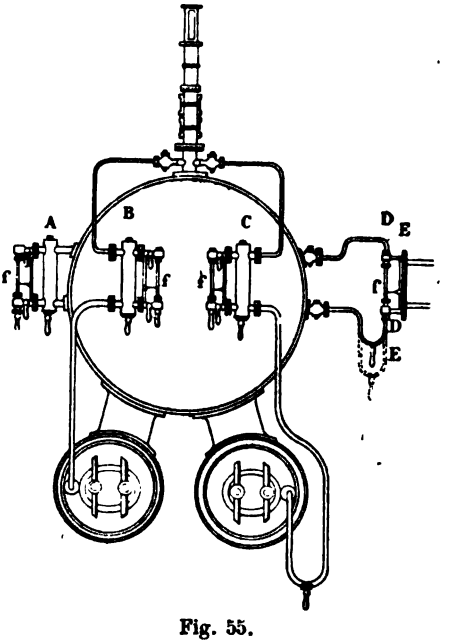


Fig. 55.

Il résulte de cette publication, que pendant le fonctionnement du générateur, le niveau A et l'indicateur magnétique accusant d'accord un niveau de 90 millimètres au-dessus du niveau normal, les indicateurs B et C étaient vides : en les purgeant l'eau apparaissait de nouveau à une bonne hauteur pour disparaître aussitôt après.

En publiant leurs expériences MM. Lethuillier et Pinel font attribuer ces dépressions à la circulation, qui aspirerait l'eau dans le cas des niveaux B et C. Les travaux de M. Dubiau nous fournissent l'explication de ces dénivellations, qui sont au contraire provoquées par l'absence de circulation de l'eau, la colonne d'eau qui se trouve dans le tube de l'indicateur faisant équilibre à une colonne plus grande à l'intérieur du générateur, mais formée de deux colonnes d'eau séparées par une colonne de vapeur.

Digitized by Google

Il est évident qu'on ne saurait déduire de la lecture d'un indicateur de niveau d'eau, placé comme ceux de MM. Lethuillier et Pinel, la valeur de la flèche de l'espace de vapeur qui se trouve dans le bouilleur, car l'eau plus dense qui est dans le tube de l'indicateur, fait équilibre à une colonne plus grande et moins dense à l'intérieur du générateur. On a même expliqué exclusivement ainsi les anomalies d'indications des niveaux d'eau, et dans de nombreux ouvrages faisant autorité nous trouvons que si le tube d'eau se raccordant à l'indicateur a 3 mètres de long, et que la température de l'eau qui le remplit soit de 20°, l'indicateur donne comme plan de niveau, à cause des différences de densité, un plan plus bas de 200, 350, 400, 460 millimètres que le niveau réel à l'intérieur de la chaudière, pour des pressions correspondantes de 4, 7, 10, 15 kilogrammes. Ces résultats ont été obtenus en admettant que la dilatation cubique de l'eau soit absolument indépendante de la pression, ce qui n'est pas exact, et en supposant réalisable en pratique des tubes de raccordement de 3 mètres de long avec de l'eau à 20°[1]. La vapeur qui se condense d'une façon continue dans le tube de vapeur de l'indicateur, et d'autant plus rapidement que celui-ci émet plus de chaleur, sert à entretenir la colonne d'eau à une température voisine de celle de la pression de fonctionnement; la différence de lecture dans les niveaux d'eau n'est pas influencée par les différences de densité autant qu'on a voulu le supposer pour trouver une explication aux dénivellations considérables dont la cause restait ignorée, et qui ne sont dues en réalité qu'au matelas de vapeur interposé dans la masse d'eau de la chaudière.

Il y a du reste un moyen des plus faciles pour éviter toute cause d'erreur dans les lectures des indicateurs de niveau : c'est de les purger; on constatera ainsi que les indications données par la colonne d'eau chaude prise immédiatement à la chaudière ne sont au maximum pour une grande longueur du tube de raccordement, que de 50 millimètres supérieures à celles données par les colonnes stagnantes supposées plus froides et plus denses.

[1] Voir, page 223, les dilatations cubiques de l'eau sous pression constante.

Digitized by Google

Les indicateurs de niveau à tube en verre sont donc loin de donner le plan réel et normal de l'eau dans le corps principal de la chaudière, lorsqu'ils sont raccordés à la tête du bouilleur. Ce montage, absolument défectueux, doit être proscrit, car les indications qu'il donne peuvent parfois devenir dangereuses : voici à titre d'exemple, des observations que nous a transmises M. Dubiau sur une chaudière semi-tubulaire.

Les bouilleurs (fig. 56) portaient, de fonte, une tubulure au sommet, destinée à la prise d'eau de la clarinette porte-tube de niveau.

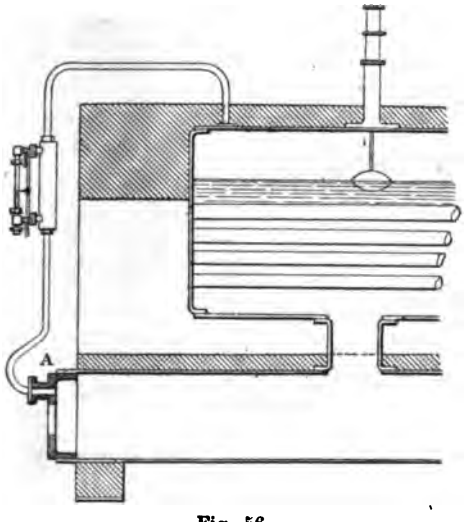


Fig. 56.

La prise de vapeur se faisait sur le sommet du corps principal.

Naturellement le ciel de vapeur, qui a été retrouvé ensuite dans tous les bouilleurs, alimentait le tuyau en cuivre A et maintenait dans le tube une quantité d'eau très apparente, à niveau très inconstant, mais donnant des indications erronées. Heureusement un flotteur Pinel a fait reconnaître ces erreurs, car le sifflet de manque d'eau fonctionnait alors que le tube de verre paraissait plein d'eau.

Dans ce cas il suffisait d'appliquer un paquet de chiffons mouillés sur le tube en cuivre pour produire une condensation et faire retomber l'eau dans le tube de verre.

Si l'on rapproche les constatations de M. Dubiau de l'expérience de laboratoire décrite à la page 12, on voit que l'eau d'alimentation doit descendre en grande partie dans le bouilleur par le cuissard avant : c'est en effet ce qui se passe en réalité. Chaque fois qu'un ballon de vapeur se dégage du cuissard, un volume à peu près égal d'eau tombe dans ce cuissard en refoulant par son poids le ballon suivant. C'est ainsi que des constructeurs de Rouen,

Digitized by Google

MM. Renaux et Bonpain, établissent depuis quelque temps leurs générateurs à bouilleur avec un seul cuissard à l'avant : leur but est de soustraire le corps principal aux efforts dus à une plus grande dilatation du bouilleur, en supprimant le deuxième point d'attache, et de remédier au cintrage des bouilleurs en maçonnant leur partie supérieure, qui n'est ainsi plus en contact avec les gaz de la combustion.

Cette disposition donne au point de vue de la puissance de

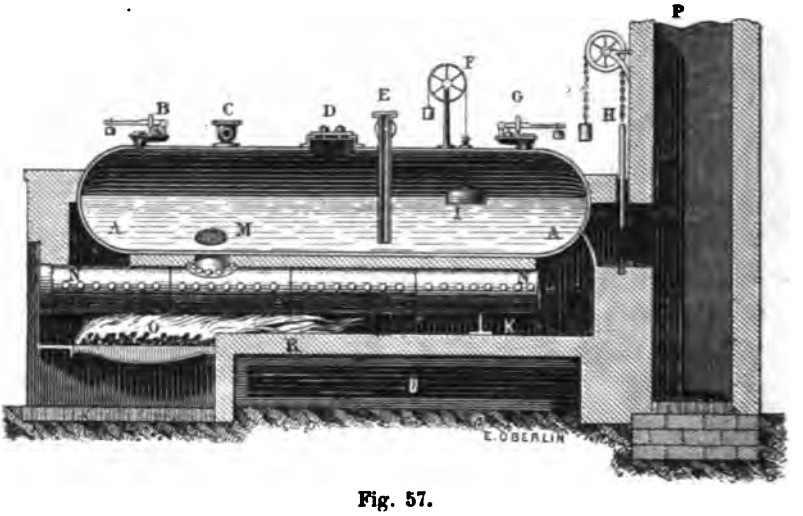


Fig. 57.

vaporisation et du rendement absolument les mêmes résultats que les chaudières avec deux ou plusieurs cuissards, et montre l'inutilité de l'adjonction d'un deuxième cuissard pour assurer un retour d'eau et une circulation que les lois physiques ne permettent pas d'obtenir. Elle n'est pas nouvelle, car Péclet (*Traité de la chaleur,* vol. II) donne le dispositif de la figure 57.

Il résulte de l'ensemble de ce qui précède que dans les générateurs de vapeur du type dit à bouilleur le dégagement de la vapeur est fortement entravé ; qu'il n'y a pas de circulation d'eau dans le bouilleur et que les courants de convection ne peuvent monter jusqu'à la surface libre dans le corps principal ; ceci fait baisser la puissance de vaporisation dans des proportions considérables, car la puissance d'absorption de l'eau contenue dans le

Digitized by Google

bouilleur est d'autant diminuée, qu'elle contient une plus grande proportion de vapeur.

Chaudière à bouilleurs et réchauffeurs. — Ce type de générateur est également fort répandu : il se compose d'une chaudière à bouilleurs ordinaires, à laquelle fait suite une série de bouilleurs réchauffeurs, la disposition de ceux-ci variant d'après les constructeurs. La figure 58 représentent un générateur de ce type, tel que l'établit la maison Farcot; l'eau d'alimentation est intro-

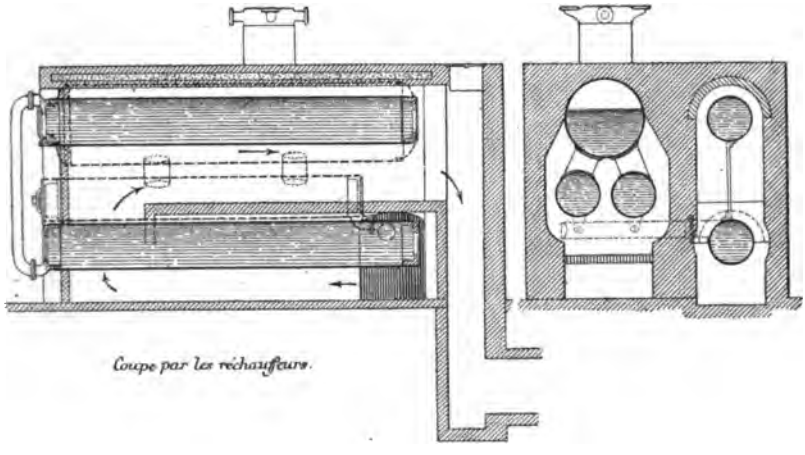


Fig. 58.

duite dans le réchauffeur supérieur, d'où elle est refoulée dans celui du bas, pour passer ensuite dans les deux bouilleurs à leur extrémité arrière. Par cette disposition on évite autant que possible la surchauffe du dernier réchauffeur, car le courant des gaz chauds qui s'établit lèche la partie inférieure du cylindre.

Les observations relatives aux chaudières à bouilleurs et aux réchauffeurs, s'appliquent aux générateurs de ce type.

Chaudière multibouilleurs. — M. Artige à Paris avait, il y a longtemps, construit un type de chaudière formé de plusieurs bouilleurs superposés, qu'il avait abandonné par suite des graves mécomptes qu'ils occasionnaient, et qui ont récemment fait une nouvelle apparition dans le monde industriel, avec des résultats peu satisfaisants.

Digitized by Google

La figure 59 donne le dispositif d'ensemble d'un appareil de ce type. Il suffit de l'examiner pour reconnaître que, abstraction faite de l'obstacle supplémentaire au dégagement de la vapeur créé par les cuissards de la deuxième rangée, la hauteur du niveau normal de l'eau au-dessus de la génératrice supérieure du bouilleur de coup de feu étant de $1^m,700$ minima et $1^m,850$ maxima, la flèche de l'espace de vapeur dans ce bouilleur devrait osciller normalement entre 120 et 135 millimètres. Elle

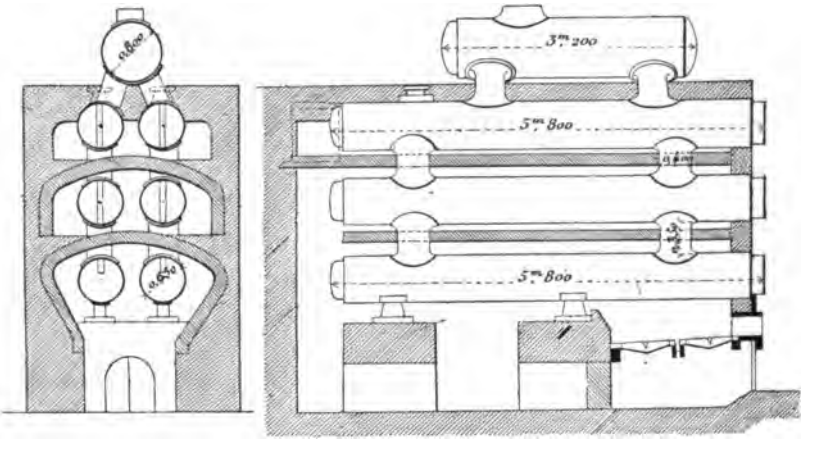


Fig. 59.

est en réalité plus importante, car la vapeur produite dans le deuxième bouilleur doit se dégager par le même cuissard que celle venant du bouilleur de coup de feu, et crée ainsi un obstacle nouveau au dégagement de la vapeur par le cuissard inférieur. Il y a donc en fonctionnement normal dans ce type de chaudière trois plans de niveau d'eau distincts, un dans chaque bouilleur d'une série verticale. On comprend aisément que si, par suite d'un accident assez facile, une ouverture se produisait au droit du foyer dans la voûte surbaissée qui se trouve au-dessus des bouilleurs de coup de feu, un dard de chalumeau très intense viendrait frapper le bouilleur intermédiaire : la production de vapeur de ce dernier augmenterait dans une très forte proportion et, en s'opposant au dégagement de la vapeur du bouilleur inférieur, y occasionnerait un abaissement du plan de niveau d'eau en refoulant l'eau de ce bouilleur par la fourche d'alimentation.

Digitized by Google

La surchauffe et la rupture de la tôle de coup de feu en seraient la conséquence inévitable : c'est en effet à un accident de cette nature que doit être imputée l'explosion d'un de ces appareils qui s'est produite en mai 1892 dans une brasserie à Tourcoing, sur un générateur construit et installé l'année précédente seulement.

Ce type de chaudière est d'une construction fort économique, mais il aggrave tous les inconvénients des chaudières à bouilleurs ordinaires.

Chaudières cylindriques tubulaires. — Cette modification des générateurs cylindriques simples est caractérisée par l'insertion d'un certain nombre de tubes, d'un diamètre plus ou moins grand,

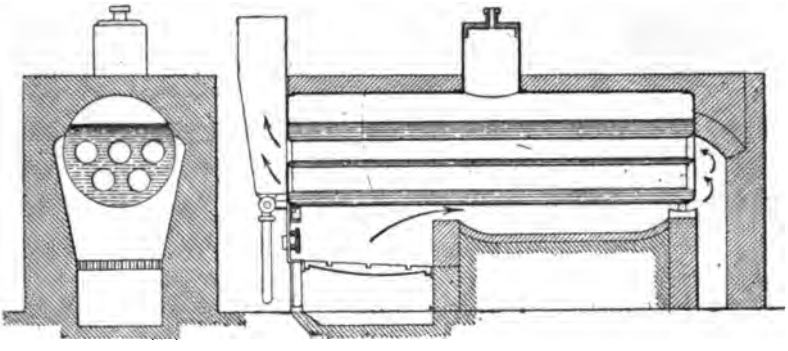


Fig. 60.

placés dans l'intérieur du corps cylindrique et le traversant dans toute sa longueur : les produits de la combustion les parcourent en deuxième ou troisième retour de flammes.

Lorsque les tubes de retour de flammes sont en petit nombre et de grand diamètre, le générateur s'appelle plus particulièrement *chaudière cylindrique à carneaux intérieurs :* il est sous cette forme (fig. 60) assez répandu en Amérique : ces carneaux tubulaires métalliques sont formés de viroles cylindriques rivées ensemble, et assemblés par les extrémités sur les fonds.

La chaudière cylindrique tubulaire proprement dite (fig. 61) est au contraire traversée par un faisceau de tubes de petit diamètre, soudés par recouvrement ou étirés, lesquels sont insérés dans les fonds et y sont fixés dans des trous soigneusement alésés, par une opération appelée mandrinage, qui consiste à laminer avec

Digitized by Google

un outil spécial le métal des tubes contre la surface des trous destinés à les recevoir, à laquelle ils adhèrent par frottement.

Parfois l'une des extrémités des tubes est renflée et les trous dans le fond ou plaque tubulaire d'entrée percés en conséquence afin de rendre plus facile l'enlèvement d'un tube recouvert d'une couche de dépôt ; parfois, comme dans les tubes Bérendorf, ils portent à chaque bout une virole soudée et tournée cône dans le même sens, et assez différentes pour que le tube puisse s'introduire à travers une des plaques tubulaires, et s'adapter dans les

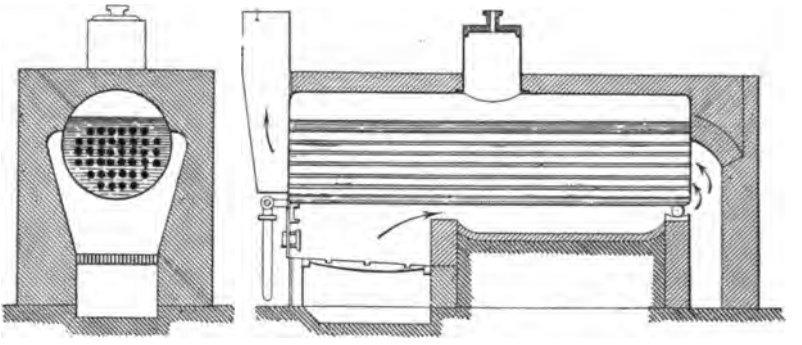


Fig. 61.

alésages coniques de ces plaques : le tube est introduit à force et fait joint aux deux bouts par son serrage : une plaque de garde empêche la sortie des tubes par la différence de pression sur les deux cônes. Les tubes mandrinés sont supposés entretoiser solidement les plaques tubulaires l'une à l'autre, mais leur enlèvement est difficile ; nous verrons plus loin que cet entretoisement n'est réel que jusqu'à la première surchauffe ; l'amovibilité est relativement assurée par les tubes Bérendorf, mais l'entretoisement des plaques doit être particulièrement soigné, ces tubes n'entretoisant pas par eux-mêmes.

L'emploi de tubes de petit diamètre permet une notable diminution des dimensions extérieures de la chaudière pour une surface de chauffe donnée et permet avec plus de sécurité l'emploi de hautes pressions de vapeur.

Les remarques de la page 165 sur les chaudières cylindriques à un carneau intérieur de retour s'appliquent aux types à carneaux multiples, mais dans ces dernières les courants de convection

Digitized by Google

qui se produisent sur les parois des carneaux se gênent mutuellement.

Quant aux chaudières cylindriques tubulaires, la division du courant des gaz chauds en un très grand nombre de veines, facilite la transmission de la chaleur au métal et améliore de beaucoup le rendement économique de l'appareil, à la condition que les gaz soient parfaitement brûlés avant leur entrée dans le faisceau ; toutefois, le faisceau de tubes n'agit comme écran de direction que pour une partie seulement des courants de convection qui se produisent sur les parois de coup de feu : une partie de ce courant et des bulles de vapeur qu'il entraîne doit se frayer un passage à travers les intervalles des tubes, qui arrêtent la vapeur au passage et gênent son dégagement : l'efficacité de ces surfaces de chauffe qui se trouvent ainsi en contact avec de la vapeur est fortement diminuée.

Les agglomérations de dépôts calcaires prennent une importance désastreuse dans les chaudières tubulaires, à cause des difficultés que présente leur enlèvement : très souvent le faisceau est complètement noyé dans un seul bloc d'incrustations ; dans tous les cas, quel que soit le mode d'insertion des tubes, fixés à demeure ou amovibles, il faut recourir au détubage pour l'enlèvement des dépôts.

Chaudières semi-tubulaires à bouilleurs. — La chaudière semi-tubulaire (fig. 62) se compose essentiellement d'une chaudière à bouilleur ordinaire, avec un faisceau de tubes placés dans le corps cylindrique supérieur, lequel a dans ce cas un diamètre beaucoup plus grand que dans le cas de la chaudière à bouilleurs. Le rendement de ce genre de chaudière est meilleur que celui des types précédents, mais sa puissance de vaporisation par mètre carré de surface de chauffe est très faible si l'on veut obtenir ce rendement élevé. En effet, à tous les inconvénients signalés dans le paragraphe des chaudières à bouilleurs, viennent ici s'ajouter la gêne considérable apportée au dégagement de la vapeur par le faisceau tubulaire et les agglomérations de dépôts qui s'y produisent. Il est vrai que les constructeurs de ce genre de chaudières soutiennent que la division par le faisceau tubulaire des ballons de vapeur

Digitized by Google

se dégageant des cuissards, est un remède efficace contre les entraînements d'eau. Dans une communication faite en juin 1892 à la Société des Ingénieurs civils, sur l'installation modèle de 15 440 mètres carrés de surface de chauffe de chaudières de ce type à la raffinerie Say, nous relevons qu'à l'allure normale de 5 litres d'eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure, le rendement de ces chaudières en vaporisation appa-

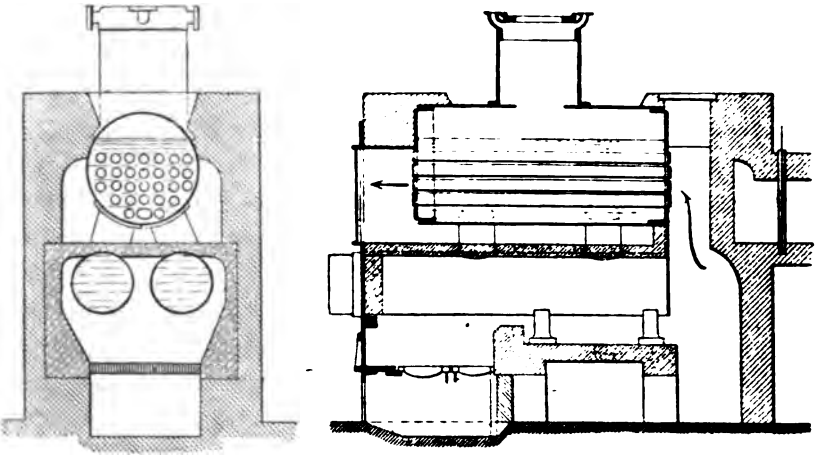


Fig. 62.

rente est d'environ 9 litres d'eau vaporisée par kilogramme de charbon pur brûlé, c'est-à-dire déduction faite des cendres et escarbilles. Comme on le fait remarquer, c'est là un rendement industriel remarquable, mais il est toutefois nécessaire de constater que l'on rencontre rarement dans l'industrie des entreprises permettant d'obtenir ces résultats par l'immobilisation d'un capital énorme (plus de 2 millions de francs). Il ne manque pas de types de chaudières produisant 10 litres par mètre carré de surface de chauffe dans les mêmes conditions de rendement : on aurait pu ainsi économiser un million sur les frais d'installation : il n'y a pas que le coût du charbon seul dont on doive tenir compte dans le prix de revient de la tonne de vapeur. La chaudière semi-tubulaire est du reste normalement établie pour une vaporisation de 8 à 10 litres d'eau par mètre carré de surface de chauffe et par heure ; ce n'est qu'à l'allure réduite de moitié que l'on doit attribuer les résultats économiques réalisés

Digitized by Google

dans cette exploitation, qui est du reste confiée à un personnel dirigeant d'élite, appuyé de tous les perfectionnements que les progrès de l'art de l'ingénieur peuvent mettre à sa disposition.

La chaudière semi-tubulaire est à tort réputée dans certaines régions de la France comme un générateur perfectionné et à grand rendement ; c'est un appareil excellent pour le constructeur, très défectueux pour l'industriel, qui serait dans certains cas fort étonné de constater, en bouchant l'extrémité des tubes, qu'il obtient sensiblement de son générateur le même travail après suppression d'une notable partie de la surface de chauffe ; ce n'est en effet que seulement lorsque la combustion est complète dans le foyer que la surface tubulaire peut produire ; ceci est rarement rencontré dans l'industrie, car on peut souvent rallumer les gaz à la sortie des tubes s'ils les parcourent en deuxième retour.

Chaudières verticales. — Presque toutes les chaudières verticales sont à foyer intérieur. Ce n'est guère que dans quelques usines métallurgiques que l'on a employé des chaudières verticales à chauffe extérieure par les gaz sortant des fours à coke ou fourneaux sidérurgiques.

La figure 63 représente la chaudière qui a été appliquée vers 1865 à tous les fours à puddler et à réchauffer de la nouvelle forge du Creusot. Chaque four a une chaudière semblable, qu'il chauffe par sa chaleur perdue, le fourneau en briques de la chaudière lui sert de cheminée ; pour un four à puddler, la longueur de la chaudière est de $13^{m},30$ et son diamètre de 1 mètre ; la partie qui contient la vapeur a 3 mètres de hauteur. La surface de chauffe est de 26 mq environ. Le timbre est de 5 atmosphères ; il faut observer, à cet égard, que le bas de la chaudière supporte environ une atmosphère de plus que le haut ; les soupapes de sûreté sont au haut de la chaudière.

L'alimentation réclame l'attention la plus soutenue de la part du chauffeur ; car le niveau de l'eau présentant une surface de faible étendue, s'il arrive que la dépense de vapeur devienne un peu plus grande qu'à l'état normal, faute de surveillance, le niveau de l'eau peut descendre au-dessous de la limite supérieure

Digitized by Google

de la surface de chauffe, ce qui crée un danger de surchauffe, d'après ce qui a été précédemment dit. D'autre part les lois physiques suivant lesquelles se forme la vapeur révèlent ce fait, que la tension des bulles de vapeur qui prennent naissance à la partie inférieure du vase est plus grande que celle des bulles formées au sommet. Il suit de là que les premières, en se dégageant, produisent dans toute la masse liquide un mouvement désordonné capable d'opérer la disjonction des différentes parties de la chaudière.

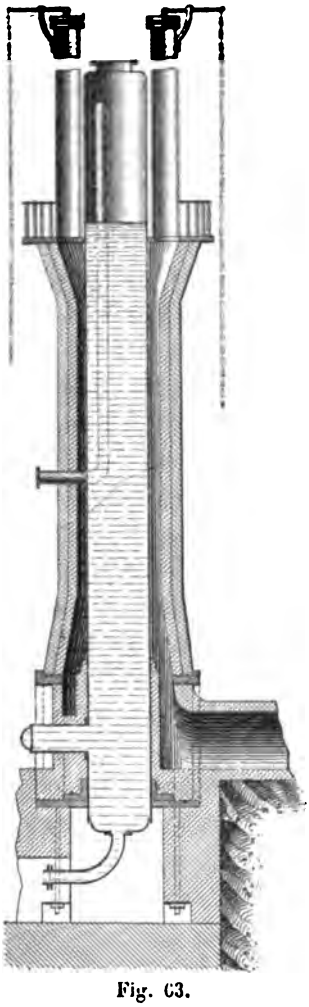


Fig. 63.

Enfin les chaudières verticales de ce type présentent encore d'autres inconvénients signalés par M. Resal (*Traité de mécanique générale*) :

« 1° La production de vapeur par mètre carré de surface de chauffe est plus faible que dans les chaudières horizontales;

« 2° Le refroidissement extérieur est beaucoup plus considérable;

« 3° Les dépôts dans le fond de la chaudière atteignent rapidement de grandes épaisseurs et obligent à des nettoyages très fréquents;

« 4° La surface liquide étant beaucoup plus restreinte que dans les autres, les variations de niveau sont bien plus grandes; l'ébullition plus tumultueuse projette de grandes quantités de poussière d'eau dans la vapeur, en sorte que celle-ci est très humide et donne des eaux de condensation très abondantes dans les conduites et dans les machines ;

« 5° La surveillance et le service sont moins faciles à cause des grandes hauteurs de ces appareils. »

Digitized by Google

CHAPITRE XII

LES CHAUDIÈRES A FOYER INTÉRIEUR

Avantages du foyer intérieur. — L'emploi du foyer intérieur a précédé les chaudières tubulaires ; on y a été conduit par différentes considérations résultant de la destination spéciale des générateurs, tel, par exemple, le cas des chaudières de bateaux à vapeur ; de plus, on eut l'idée que le combustible serait ainsi mieux utilisé.

Si l'on considère le mode de construction des chaudières à foyer extérieur, on voit qu'elles présentent un développement considérable de surface de briques exposé au refroidissement ; d'autre part, une grande partie de la chaleur rayonnante du foyer n'agit pas directement sur la chaudière ; enfin les parois en briques du fourneau sont perméables et sans même tenir compte des fissures qui peuvent se produire dans la maçonnerie, une certaine quantité d'air froid, appelé à travers les murs, vient se mêler aux gaz chauds et en réduit l'effet utile par suite de l'absorption de chaleur correspondant à son élévation de température.

On doit à M. Scheurer-Kestner (*Bulletin de la Société de Mulhouse*, 1869) des expériences très complètes sur l'utilisation de la chaleur dans les chaudières à vapeur à foyer extérieur : il résulte de la moyenne de tous les essais qui ont été faits sur une chaudière à six bouilleurs, munie de six réchauffeurs latéraux, que la chaleur produite dans le foyer se répartit de la manière suivante :

Digitized by Google

Calories dans la vapeur	60,5	p. 100
— dans les gaz	5,5	—
— dans les cendres	1,5	—
— enlevées par les gaz non brûlés	5,0	—
— enlevées par le noir de fumée	0,5	—
— enlevées par la vapeur d'eau de la fumée.	2,5	—
— perdues par la maçonnerie	24,5	—

Cette quantité considérable de chaleur perdue par le refroidissement extérieur pourra se trouver récupérée en partie si l'on emploie une chaudière à foyer et chauffage exclusivement intérieurs et bien construite ; et en comparant les types les plus perfectionnés de chaudières à foyer intérieur et à foyer extérieur, M. Scheurer-Kestner arrive à cette conclusion que pour les premières l'effet utile serait de 75 p. 100, tandis qu'il ne serait que de 65 p. 100 pour les dernières.

Chaudières de Cornouailles. — La figure 64 représente une disposition de ce type : parfois les gaz reviennent à l'avant par un

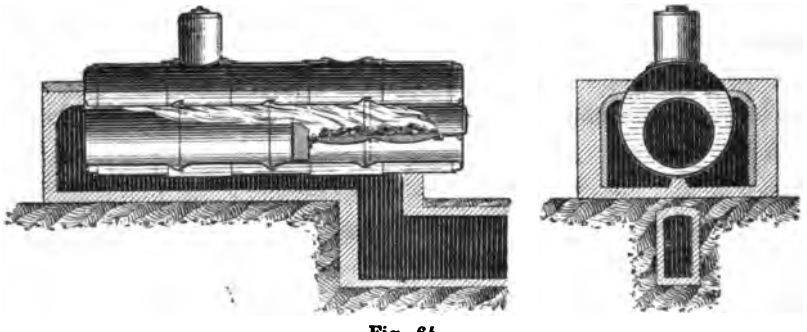


Fig. 64.

carneau qui règne sous la chaudière et sont ramenés à l'arrière vers la cheminée par deux carneaux latéraux.

Chaudière de Lancashire. — La figure 65 représente ce type de générateur qui a deux foyers intérieurs, et est le modèle de chaudière que l'on rencontre le plus souvent en Angleterre.

Les foyers dans ce dispositif sont chargés alternativement, dans le but d'obtenir une combustion aussi complète que possible des matières volatiles distillées.

Comme pour les chaudières de Cornouailles les gaz sont sou-

Digitized by Google

vent ramenés à l'avant et ensuite renvoyés à l'arrière, le carneau de la partie basse étant parcouru en deuxième ou troisième retour.

Dans ces chaudières les courants de convection ne sont pas entravés et la surface libre d'évaporation est considérable, car elle est presque toujours supérieure à la surface de chauffe directe :

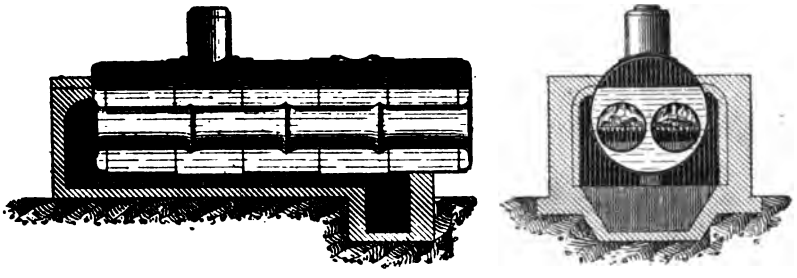


Fig. 65.

le dégagement de la vapeur y est donc très facile, et la puissance de vaporisation normale par mètre carré de surchauffe y est environ le double de celle d'une chaudière à bouilleur.

Déformations des foyers intérieurs. — Une des objections principales que l'on peut formuler contre le dispositif des chaudières de Cornouailles ou Lancashire, c'est le grand diamètre qu'il faut donner aux cylindres intérieurs formant foyer, ce qui ne leur permet pas, à moins de fortes épaisseurs, d'offrir suffisamment de résistance à l'écrasement, surtout aux pressions élevées qui sont actuellement d'un emploi ordinaire.

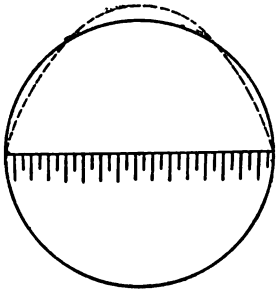


Fig. 66.

Dans toutes les chaudières à foyer intérieur celui-ci ne conserve jamais, après peu de jours de fonctionnement, sa forme cylindrique originelle : en général il s'aplatit légèrement et s'allonge vers le haut comme le montre en pointillé la figure 66 lorsque la grille est bien établie : souvent la grille, si on ne lui a pas ménagé suffisamment de jeu dans le sens transversal, exerce par sa dilatation une poussée latérale qui amène l'aplatissement du sommet du foyer. En dehors de cette cause, l'aplatissement des

Digitized by Google

foyers intérieurs se produit même si le niveau de l'eau dans la chaudière est maintenu constamment à la hauteur normale : il a

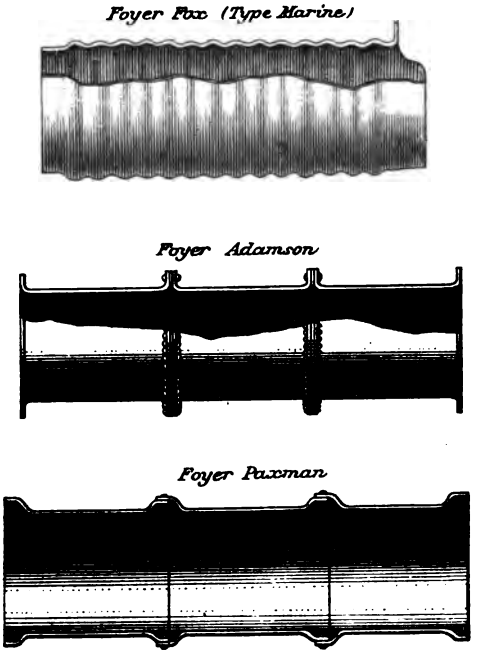


Fig. 67.

lieu alors toujours à un angle de 45° au-dessus de la grille, et il est facile de s'expliquer ce phénomène : les bulles de vapeur qui se produisent en nombre considérable le long du foyer à proximité de la grille suivent la paroi et viennent s'agglomérer dans la région ci-dessus à celles qui y sont engendrées, pour se détacher ensuite et monter à la surface ; cette partie des foyers qui est exposée au rayonnement se surchauffe inévitablement n'étant pas suffisamment rafraîchie par l'eau, et le métal à haute température perdant de sa résistance, il s'aplatit et parfois se déchire sous l'influence de la pression intérieure. Pour obvier à ces inconvénients on a renforcé par divers dispositifs (fig. 67) les foyers intérieurs, mais ces augmen-

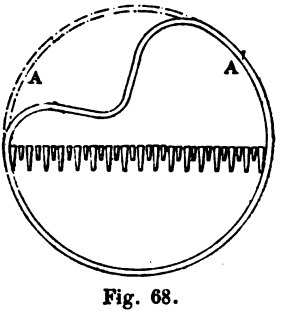


Fig. 68.

Digitized by Google

tations de résistance, qui permettent l'emploi de plus hautes pressions de vapeur, ne suppriment pas la surchauffe, qui est due à la forme d'origine du foyer, et l'aplatissement qui en est

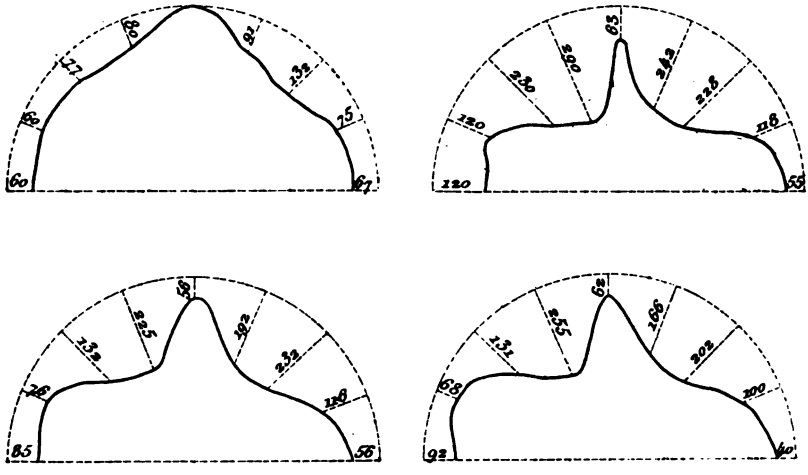


Fig. 69.

la conséquence inévitable. Nous citerons à l'appui, parmi tant d'autres, l'accident récent survenu aux essais du « Dupuy de Lôme ». Les foyers, du système Fox, se sont affaissés suivant le

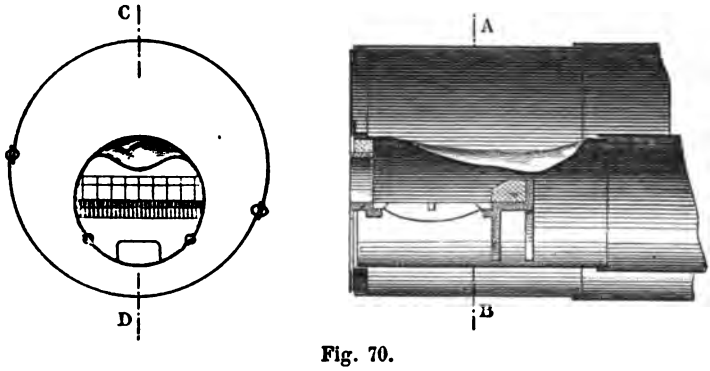


Fig. 70.

croquis de la figure 68 : l'enquête a fait reconnaître aux points A et A′ l'existence de fortes oxydations du métal, et qui n'ont pu se produire que par surchauffe locale ; l'oxyde de fer recueilli avait conservé son caractère magnétique.

On a attribué, d'une façon générale, l'affaissement des foyers

Digitized by Google

au manque d'eau et plus tard à l'action des corps gras introduits dans le générateur avec les eaux de condensation ; on pensait avec raison que ces huiles, déposées sur les tôles de coup de feu, les isolaient de l'eau et en amenaient la surchauffe. Mais le fait se produit également sur des chaudières actionnant des machines sans condensation, tel l'aplatissement de foyer des chaudières du remorqueur *le Poulmic* survenu en rade de Brest, tel le spécimen n° 16 envoyé en 1889 à l'Exposition universelle par les Associations françaises des Propriétaires d'appareils à vapeur et dont différents profils sont représentés à la figure 69.

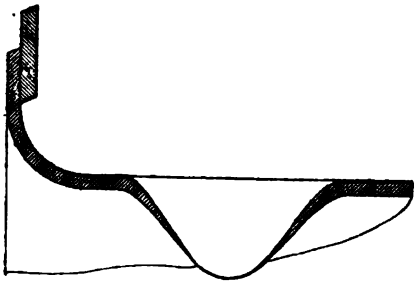


Fig. 71.

Les ciels des foyers, et non les côtés, s'affaissent en cas de manque d'eau, et en cas d'accumulation de dépôts (fig. 70) ; quant aux corps gras, ceux-ci occasionnent directement une poche (fig. 71) et par leur présence contribuent dans une large mesure aux affaissements généraux en facilitant la formation des matelas de vapeur.

M. Stromeyer (*Marine Boiler Management*) cite le cas d'une grave avarie de ce genre qui s'est produite sur un bateau monté avec quatre chaudières : l'une des chaudières avait dû être réparée en mer, et lorsqu'elle fut remise en batterie, les foyers des trois autres générateurs s'affaissèrent ensemble par les côtés. Comme cet auteur l'explique, il est certain qu'au moment de la mise en batterie de la quatrième chaudière, les indications du manomètre de celles-ci étaient fausses et la vapeur des trois autres appareils, en se précipitant dans le quatrième, amena une baisse de pression qui provoqua une forte ébullition sur les foyers : ceux-ci, normalement surchauffés, atteignirent en un temps très court une température assez élevée pour que le métal cédât sous l'influence de la pression intérieure.

En général sur un bateau, plusieurs foyers, appartenant à des chaudières différentes d'une même batterie, s'affaissent en même temps par les côtés.

Digitized by Google

Dans le cas des chaudières à deux ou trois foyers intérieurs le rapprochement des foyers facilite les agglomérations de vapeur et la surchauffe : ceci explique pourquoi les affaissements forment

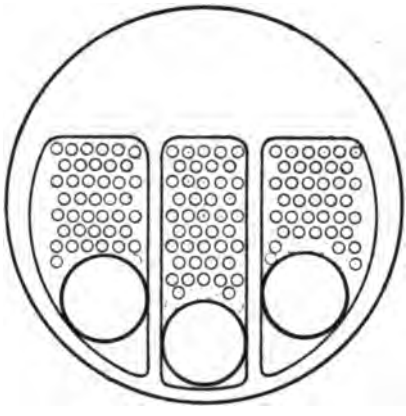


Fig. 72.

une avarie courante en marine, où l'on rencontre surtout des types de chaudières établis d'après le schéma de la figure 72.

Chaudière Galloway. — Ce type de générateur se compose (fig. 73) d'un corps cylindrique ayant deux foyers intérieurs cylindriques dont la longueur ne dépasse guère celle de la grille, se réunissant après l'autel en un carneau unique dont la section affecte la forme d'un haricot : dans ce carneau sont placés de nombreux tubes tronconiques, dont la partie évasée se trouve du côté de la surface libre de l'eau, disposition par laquelle on croit faciliter le dégagement des bulles de vapeur. Ces tubes, qui augmentent dans une notable proportion la surface de chauffe, servent également à entretoiser les parois du carneau, et assurent un meilleur brassage des gaz brûlés et une meilleure utilisation de la chaleur. Sur chaque côté du carneau postérieur sont découpées deux ouvertures elliptiques fermées par des poches faisant saillie dans le foyer, et destinées à obtenir un brassage encore plus complet des gaz en renvoyant vers le centre les veines gazeuses qui cheminent le long des côtés du carneau.

Ce type de chaudière jouit en Angleterre d'une très grande faveur : on a supposé que la disposition des tubes dans le foyer

Digitized by Google

produisait une circulation très active de l'eau, ce qui en augmentant la puissance de la surface de chauffe tendrait à égaliser

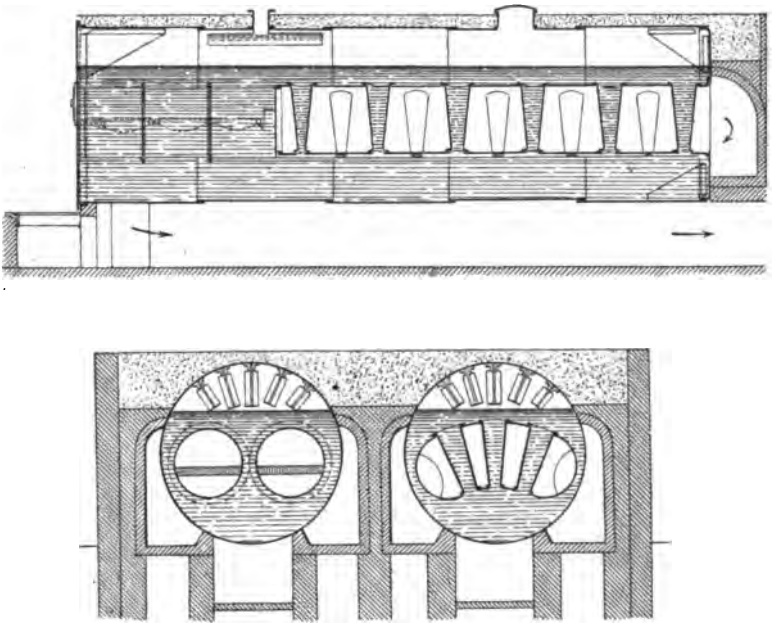


Fig. 73.

la température de toutes les parties de l'appareil. Les tubes tronconiques sont même connus généralement sous l'appellation

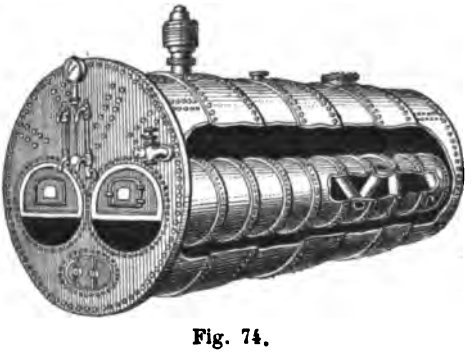


Fig. 74.

de *tubes de circulation*, et l'on en place quelques-uns presque toujours dans les carneaux des chaudières Cornouailles et Lancashire (fig. 74), car le défaut capital des générateurs à foyers inté-

Digitized by Google

rieurs, c'est le manque absolu de circulation d'eau. Mais ces tubes de circulation sont loin de répondre à l'efficacité qu'on leur a attribuée à tort. Il se produit dans les tubes Galloway, et sur les ciels des carneaux, des courants de convection qui mettent en mouvement la masse d'eau qui se trouve au-dessus du plan horizontal passant par les grilles, mais toute la masse d'eau qui se trouve en dessous de ce plan est immobile et ne participe à aucun mouvement.

Expériences de M. Fletcher sur les inégalités de températures dans les chaudières à foyer intérieur. — Au cours de ses expériences sur les ciels de foyer portés au rouge, M. Lavington E. Fletcher a eu l'occasion de faire des observations très intéressantes sur l'absence totale de circulation dans les chaudières à foyer intérieur, avec ou sans tubes de circulation, et sur les chaudières Galloway. Nous extrayons de son mémoire[1] le résumé des observations relatives à ce fait.

« On a profité de cette chaudière d'essais pour étudier d'autres questions en dehors de l'effet produit par l'eau froide sur les ciels de foyers rougis ; ainsi, on a cherché à se rendre compte des effets de la chaleur sur l'eau, à comparer l'échauffement de la surface à celui des couches du fond, et à examiner quels sont les mouvements produits par l'effet du feu sur les différentes parties de la chaudière.

« Pour étudier la température, nous avons indiqué que deux robinets *ad hoc* avaient été montés sur la façade de la chaudière, l'un à 150 millimètres au-dessus des sommets des foyers et l'autre à 75 millimètres du fond du corps extérieur, chacun portant un tube qui s'avançait à la distance de $3^{m},60$ dans la chaudière.

« A 2 h. 20 minutes, on alluma les feux, l'eau étant à 250 millimètres au-dessus des foyers, les registres ouverts en grand.

« Le tirage de la cheminée, observé plusieurs fois, atteignit 11 millimètres d'eau après une heure de marche.

« La température des gaz des foyers, prise au moyen du

[1] *Redhot Furnace crown Experiments.* On trouvera également le rapport complet dans le journal *Engineering*, n° du 30 janvier 1891 et suivants.

Digitized by Google

pyromètre Casartelli près de la base de la cheminée, fut de 210° au maximum.

« Toutes les 2 ou 3 minutes, on prenait la température de la surface et du fond de l'eau ; la température de celle du fond fut observée même après que celle de la surface avait atteint 100° et que la vapeur commençait à se former.

« L'expérience dura 1 h. 38′.

« Les soupapes se levèrent au bout de 68 minutes et sous une pression de 3k,5 : on les laissa souffler pendant 30 minutes, pour voir ce que devenait la température du fond, et on trouva qu'à la fin de l'expérience la différence de température entre l'eau de la surface et celle du fond était encore de 78°,34 [1].

« Les résultats des observations sur les températures faites pendant cette expérience figurent au tableau suivant :

COMPARAISON DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU A LA SURFACE ET AU FOND PENDANT LA MISE EN PRESSION (Degrés centigrades.)

DURÉE depuis la mise en feu.	TEMPÉRATURE			PRESSION
	FOND	SURFACE	DIFFÉRENCE	
minutes	degrés	degrés	degrés	kilogr.
0	25	28	3	
15	26	31	5	0
30	28	53	25	0
45	31	112	81	0
60	36	130	94	0,49
75	39	143	104	1,76
80	39	147	108	3,02
82	39	148	109	3,37
83	40	148	108	3,51
85	41	148	107	3,51
89	43	148	105	3,58
95	45	149	104	3,65
98	47	145	98	3,30

Ces résultats firent voir la nécessité d'expériences du même genre sur d'autres chaudières en service journalier et pour avoir un champ d'expériences plus étendu, on les a fait porter sur cinq chaudières d'usines.

[1] La partie basse de la chaudière était chauffée par le deuxième parcours de flammes, les côtés par le troisième.

Digitized by Google

DIMENSIONS DES CHAUDIÈRES SUR LESQUELLES LES ESSAIS ONT ÉTÉ FAITS

TYPES DES CHAUDIÈRES	LONGUEUR	DIAMÈTRE du corps cylindrique	DIAMÈTRE des foyers	LONGUEUR de la grille	CIRCULATION DES PRODUITS de la combustion
A. Lancashire, 2 foyers. 4 tubes transversaux dans chaque foyer.	9m,35	2m,43	0m,96	1m,98	2e dessous. — 3e par les côtés.
B. Lancashire . . . . . Pas de tubes transversaux.	8m,53	2m,13	0m,80	1m,82	— —
A. Galloway . . . . . 33 tubes coniques, 2 poches par côté.	9m,14	2m,13	0m,83	1m,82	— —
B. Galloway . . . . . 33 tubes coniques, 2 poches par côté.	9m,14	2m,13	0m,83	1m,82	— —
C. Galloway . . . . . 30 tubes coniques, 2 poches par côté.	8m,53	2m,13	0m,83	1m,42	2e par les côtés. — 3e dessous.

« *Méthode suivie pour la conduite de ces expériences.* — Pour prendre la température, deux robinets avaient été fixés sur la façade de chaque chaudière, l'un à 76 millimètres au-dessus des sommets des foyers, et l'autre à 200 millimètres environ du fond ; tous les deux étaient munis d'un tuyau se prolongeant de 900 millimètres dans l'intérieur, de façon à ne pas prendre de l'eau trop près de la façade. Le thermomètre employé était un thermomètre construit et garanti par Casartelli.

« Le réservoir du thermomètre était dans le courant d'eau sortant du robinet.

« Comme la température était prise à la pression atmosphérique, elle ne pouvait dépasser 100° ; elle a été déterminée par calcul d'après les tables de Regnault pour les couches de la surface, mais les observations de la température du fond ont dû cesser sitôt que l'on a constaté 100°.

« Le chauffeur avait ordre de monter en pression graduellement, sans précipitation.

« Les registres étaient ouverts de ce qu'il fallait pour bien enlever la fumée du dessus du feu et conduire celui-ci lentement jusqu'au moment où l'on atteignait la pression suffisante pour mettre la chaudière en communication avec les autres de la même batterie : à ce moment, les registres étaient ouverts en grand.

Digitized by Google

« Les observations de température et de pression avaient lieu toutes les cinq minutes.

« Ces expériences ont été faites en remplissant la chaudière avec de l'eau à trois températures différentes :

« 1° *Eau froide* et on chauffait de suite ;

« 2° *Eau tiède*, c'est-à-dire que la chaudière avait été remplie vingt-quatre heures à l'avance et comme elle se trouvait au milieu d'une batterie en marche, l'eau était tiède au moment de l'allumage des feux ;

« 3° *Eau chaude*. La pompe alimentant la batterie prenant l'eau dans un réchauffeur, on avait la facilité de faire le plein avec de l'eau chaude.

« Les résultats de ces expériences sont consignés aux tableaux suivants :

AU MOMENT OU L'EAU A LA SURFACE ATTEINT 100°

Chaudières remplies à l'eau froide.

Essai n° 1.	Chaudière	Lancashire	A	Surface	100°	Fond	22°	Différence	78°
— n° 4.	—	Lancashire	B	—	100°	—	35°	—	65°
— n° 5.	—	Galloway	A	—	100°	—	25°	—	75°
— n° 7.	—	Galloway	B	—	100°	—	22°	—	78°
— n° 9.	—	Galloway	C	—	100°	—	32°	—	68°
				Moyenne.					73°

Chaudières remplies à l'eau tiède.

Essai n° 2.	Chaudière	Lancashire	A	Surface	100°	Fond	41°	Différence	59°
— n° 2A	—	Lancashire	A	—	100°	—	31°	—	69°
				Moyenne.					64°

Chaudières remplies à l'eau chaude.

Essai n° 3.	Chaudière	Lancashire	A	Surface	100°	Fond	83°	Différence	17°
— n° 6.	—	Galloway	A	—	100°	—	68°	—	32°
— n° 8.	—	Galloway	B	—	100°	—	64°	—	36°
				Moyenne.					28°

AU MOMENT OU LA PRISE DE VAPEUR EST OUVERTE ET LA CHAUDIÈRE MISE EN FONCTIONNEMENT

Chaudières remplies à l'eau froide.

Essai n° 1.	Chaudière	Lancashire	A	Surface	160°	Fond	29°	Différence	131°
— n° 4.	—	Lancashire	B	—	149°	—	55°	—	94°
— n° 5.	—	Galloway	A	—	159°	—	30°	—	129°
n° 7.	—	Galloway	B	—	162°	—	34°	—	128°
— n° 9.	—	Galloway	C	—	149°	—	24°	—	125°
				Moyenne.					119°

Digitized by Google

Chaudières remplies d'eau tiède.

Essai	n° 2.	Chaudière	Lancashire	A	Surface	159°	Fond	45°	Différence 114°
—	n° 2A	—	Lancashire	A	—	162°	—	40°	— 122°
					Moyenne.				118°

Chaudières remplies à l'eau chaude.

Essai	n° 3.	Chaudière	Lancashire	A	Surface	159°	Fond	87°	Différence 72°
—	n° 6.	—	Galloway	A	—	158°	—	72°	— 86°
—	n° 8.	—	Galloway	B	—	162°	—	72°	— 90°
					Moyenne.				83°

TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS L'ALLUMAGE
POUR QUE L'EAU DU FOND ATTEIGNE 100°

Essai	n° 1.	Chaudière	Lancashire	A	remplie avec eau froide	14°	3h,20	registre ouvert en plein depuis	1h.
—	n° 2.	—	Lancashire	A	eau tiède	39°	3h.25	—	1h.25m
—	n° 3.	—	Lancashire	A	eau chaude	92°	1h.52	—	42m
—	n° 4.	—	Lancashire	B	eau froide	14°	4h.20	—	35m
—	n° 5.	—	Galloway	A	eau froide	19°	4h. 5	—	1h.10m
—	n° 6.	—	Galloway	A	eau chaude	69°	2h.25	—	55m
—	n° 7.	—	Galloway	B	eau froide	9°	4h.10	—	50m
—	n° 8.	—	Galloway	B	eau chaude	86°	2h.37	—	37m
—	n° 9.	—	Galloway	C	eau froide	16°	4h.35	—	1h.35m

Voici les déductions qu'en tire M. Fletcher :

Il commence par faire observer que ces expériences ayant été faites sur des chaudières différentes ne sont pas strictement comparables, attendu que divers éléments d'expérience n'étaient pas les mêmes dans tous les cas; mais voici ce qui ressort de l'ensemble de ces expériences :

« 1° Dans les chaudières d'usines, pendant que l'on monte en pression, la température est beaucoup plus élevée au niveau de l'eau que dans les couches du fond ;

« 2° Cette différence est sensiblement la même, soit que les foyers soient munis de tubes transversaux ou qu'ils n'en aient pas, et *elle est encore la même avec des chaudières Galloway avec 30 et même 33 tubes;*

« 3° Il en résulte que l'emploi de ces tubes, pour activer la circulation de l'eau, *est beaucoup moins* efficace qu'on ne le pense généralement.

Digitized by Google

« L'Association n'a pas encouragé l'emploi de ces tubes et ces expériences justifient cette réserve.

« *Précautions à prendre pour éviter les efforts que subissent les tôles sous l'action de ces différences de température.*

« La première chose à faire est de rétablir, le mieux possible, l'équilibre de température dans toutes les parties de la chaudière et pour cela avoir une circulation effective.

« Une première solution est d'employer une hélice et d'établir mécaniquement la circulation. Ce dispositif est peu employé.

« Pour les chaudières marines, où le besoin de circulation se fait particulièrement sentir, on s'est servi d'un injecteur actionné par la vapeur d'une autre chaudière. Ce système a donné de bons résultats.

« Pour les chaudières d'usines, on a peu employé de moyens mécaniques pour établir la circulation ; mais on peut obtenir de bons résultats rien qu'en conduisant la chaudière d'une façon judicieuse.

« Nous voyons aux tableaux précédents que la différence de température est grandement diminuée quand on fait le plein avec de l'eau chaude. Il est donc très utile de procéder ainsi toutes les fois que cela sera possible.

« On remarque également qu'on obtient aussi de bons résultats, moins bons cependant que dans le cas précédent, quand la chaudière faisant partie d'une batterie en service, on a soin de la remplir vingt-quatre heures à l'avance, ce qui permet d'avoir de l'eau dégourdie à l'allumage des feux.

« Enfin, il est très désirable de monter en pression graduellement et très lentement pour éviter les déformations des foyers.

« Il ne faut pas oublier que, dans ces expériences, toutes les fois qu'on a mis en feu avec la chaudière pleine d'eau froide, on remarquait, vers le milieu de la durée de l'expérience, que des suintements se produisaient aux joints des foyers avec la tôle de devant. Ces suintements disparaissaient vers la fin de l'expérience.

« Quand cela est possible, il est bon d'allumer douze heures avant le moment où il faudra ouvrir la valve de vapeur.

« Dans certains cas, on trouvera avantageux d'ouvrir la vidange, pendant que l'on monte en pression, de façon à abaisser

Digitized by Google

le niveau d'un décimètre environ, chassant ainsi un volume d'eau froide gênant, qui sera remplacé par l'eau des couches supérieures. »

Effets des inégalités de température. — Les effets désastreux dus aux inégalités de température ne se font sentir sur les chaudières terrestres à foyer intérieur, montées dans des fourneaux en maçonnerie avec un carneau de retour de fumée en dessous de la chaudière, que pendant l'allumage et les quelques heures qui le suivent si l'alimentation est faite avec de l'eau chaude et dans la vapeur ; ils persistent au contraire pendant toute la durée du fonctionnement si l'alimentation se fait à l'eau froide, car celle-ci plus lourde tombe au fond et n'y est remplacée que par un nouveau volume d'eau froide ; il faut éviter à tout prix dans ces appareils l'introduction de l'eau d'alimentation en dessous du foyer, le montage sans fourneau en brique, et sans carneau de deuxième retour des produits de la combustion à la partie basse du générateur.

C'est surtout dans la marine que se font sentir les effets occasionnés par les inégalités de température des chaudières à foyers intérieurs : dès le début du fonctionnement de ces appareils il est très difficile d'éviter les fuites à la partie inférieure, et après quelques années de fonctionnement, les réparations, les matages, les changements de rivets ne font qu'aggraver le mal : dans les chaudières ayant 4 mètres de diamètre, il est impossible d'éviter les fuites sans l'emploi de moyens mécaniques puisant l'eau dans les parties basses et les refoulant à la hauteur du niveau normal. Nous avons examiné les différents moyens employés dans ce but au chapitre IX, mais comme, sauf l'émulseur Dubiau qui est de création toute récente, ils sont loin d'être exempts d'inconvénients, on construit en Angleterre des viroles soudées d'une seule pièce, ou bien on établit toute la partie inférieure jusqu'au tiers de la hauteur en une seule tôle, dont les dimensions dépassent de beaucoup les plus grandes tôles que l'on puisse produire dans les usines françaises.

La figure 75 donne une idée de cet état de choses dans une chaudière à foyer intérieur en fonctionnement : on y voit les

Digitized by Google

courants de convection qui se produisent des deux côtés du foyer au-dessus de la grille, l'agglomération des bulles de vapeur à un angle de 45° au-dessus de cette dernière, les lignes horizontales représentant air et eau d'autant plus froids, qu'elles sont plus rapprochées : ainsi dans le foyer, l'air qui s'y engouffre, la grille et les cendres, tout contribue à empêcher la chaleur de

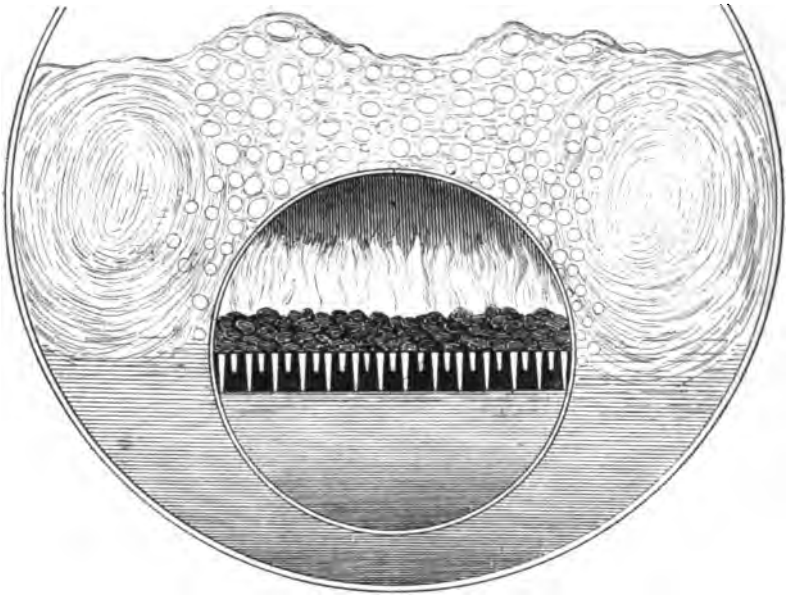


Fig. 75.

se transmettre à l'eau par la partie basse du foyer, et l'élévation de température de l'eau qui se trouve au fond ne peut être obtenue que par son remplacement par de la nouvelle eau d'alimentation ; cette vitesse ascensionnelle est négligeable, et rien ainsi ne s'oppose à ce que l'élévation de température de l'eau ne se produise que dans une seule zone voisine de la grille. Les efforts dus aux inégalités de dilatation auxquels sont soumis le foyer et l'enveloppe sont considérables, surtout le foyer, car non seulement il y a sur sa face intérieure une transition brusque d'air froid en dessous de la grille à une température de 1000 à 1200° au-dessus, mais également sur sa face extérieure du côté de l'eau il y a passage soudain de la température de l'alimentation à celle correspondant à la pression de fonctionnement.

Digitized by Google

Chaudières à galerie. — Nous ne mentionnerons qu'à titre de document historique la chaudière marine primitive, dite *chaudière à galerie* (fig. 84, 85, 86).

On a donné un grand nombre de dispositions différentes aux chaudières à galeries. Dans certains cas, deux chaudières étaient placées l'une à la suite de l'autre : la première renfermait les foyers, la deuxième les carneaux. D'autres fois, on a fait des chaudières à plusieurs étages de foyers. Toutes ces chaudières n'existent plus, et, après bien des dispositions proposées et essayées, l'emploi des chaudières tubulaires est devenu général en marine.

Chaudière à foyer intérieur, semi-tubulaire. — Ce type, représenté figure 76, consiste en une chaudière, dont le foyer

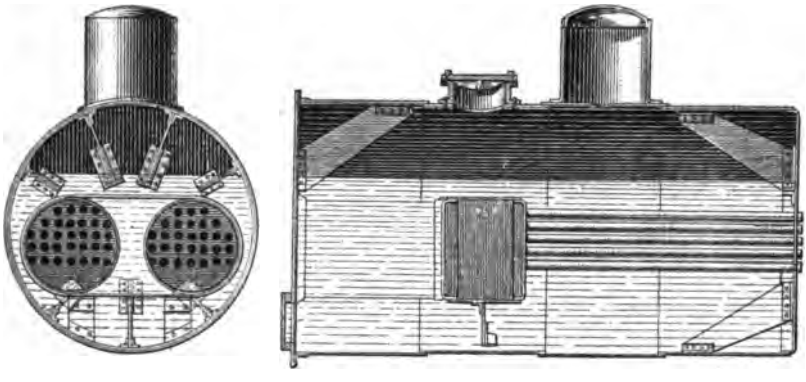


Fig. 76.

intérieur s'arrête au delà de l'autel de la grille, et son prolongement en carneau jusqu'au fond arrière est remplacé par un faisceau de tubes insérés dans ce fond et dans la plaque tubulaire qui ferme le tube foyer.

Cette disposition, peu répandue en France, l'a été davantage en Angleterre ; elle conserve tous les inconvénients des générateurs à foyer intérieur, auxquels vient s'ajouter celui de la destruction rapide de la plaque tubulaire, frappée directement par les flammes qui acquièrent une grande vitesse à leur passage par la section toujours étranglée au-dessus de l'autel : la plus grande épaisseur qu'on est forcé de donner à cette plaque, et l'accumulation de la vapeur sur sa face mouillée, accumulation due à l'obs-

Digitized by Google

tacle que crée au dégagement de la vapeur l'insertion des tubes sur la plaque, en déterminent la surchauffe. On peut ainsi, il est vrai, disposer dans un même espace une surface de chauffe beaucoup plus importante que dans le cas de la chaudière à foyer intérieur ordinaire, mais cette augmentation de puissance n'est que fictive, car les flammes s'éteignent dès leur entrée dans les tubes et ceux-ci avec le tirage ordinaire s'obstruent rapidement par le dépôt des cendres et des fumées. Le tirage forcé améliore beaucoup le rendement de ces appareils et l'efficacité des surfaces de chauffe tubulaires, car dans ce cas l'obstruction du faisceau se produit moins rapidement : c'est ce qui a fait le succès de la chaudière tubulaire de locomotive, que nous examinerons plus loin, qui ne diffère de ce type de générateur que par son grand foyer carré, disposé verticalement, et où la combustion s'opère plus complètement que dans le cas du foyer tubulaire.

Chaudières semi-tubulaires à foyer intérieur et à retour de flamme. — Cette forme de générateur comprend essentielle-

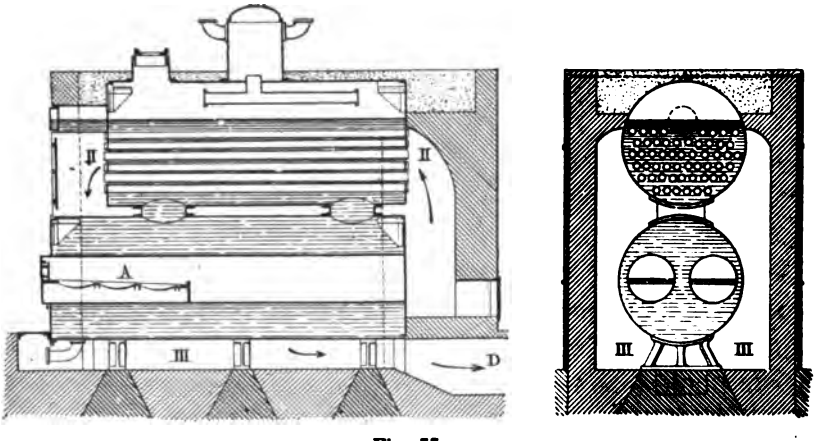


Fig. 77.

ment un ou plusieurs foyers intérieurs surmontés d'un faisceau de tubes de petit diamètre formant retour de flamme. C'est surtout dans la marine que ce type a été très répandu et les figures 77, 78, 79 montrent diverses dispositions de ces appareils variant dans les formes extérieures.

Le type représenté par la figure 77 est absolument défectueux :

Digitized by Google

il réunit tous les inconvénients des chaudières à bouilleur tubu-

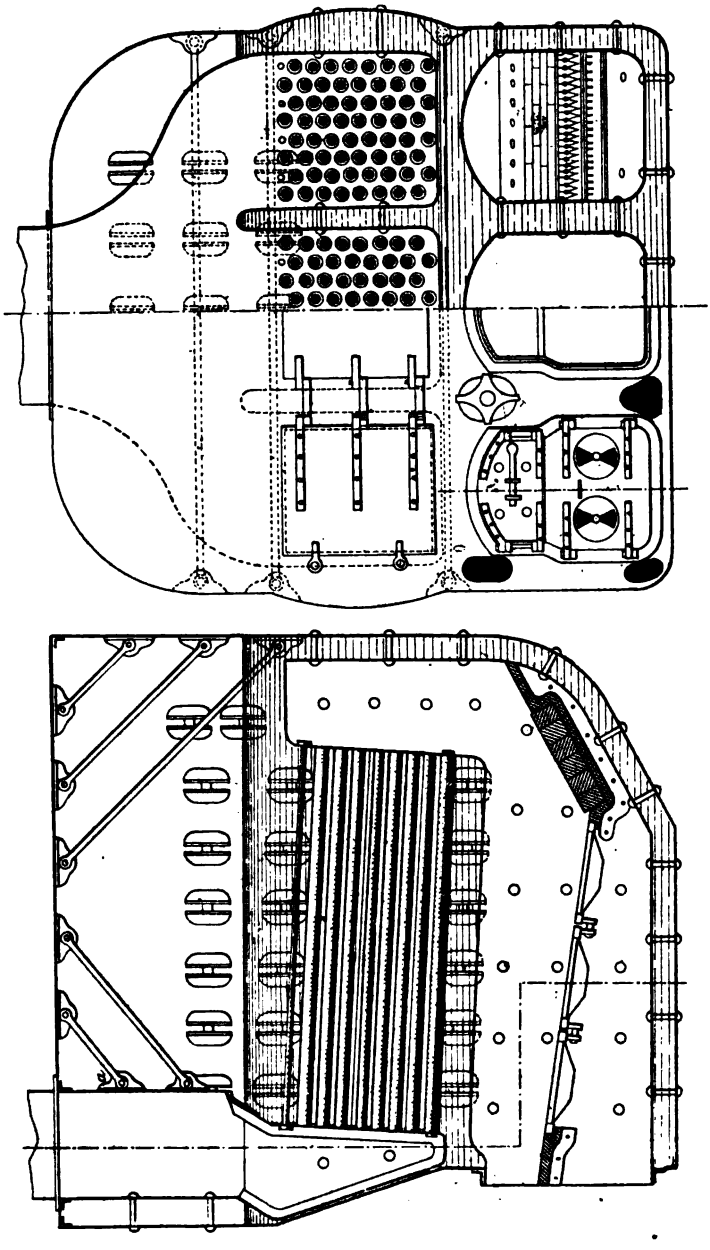


Fig. 78.

laires et des générateurs à foyers intérieurs, les avantages de chacun des types qui le composent étant détruits par les défauts

Digitized by Google

des autres ; aussi est-il très peu répandu, car il a donné lieu à de nombreux mécomptes.

Le type de la figure 78 ne donnait satisfaction qu'à la condi-

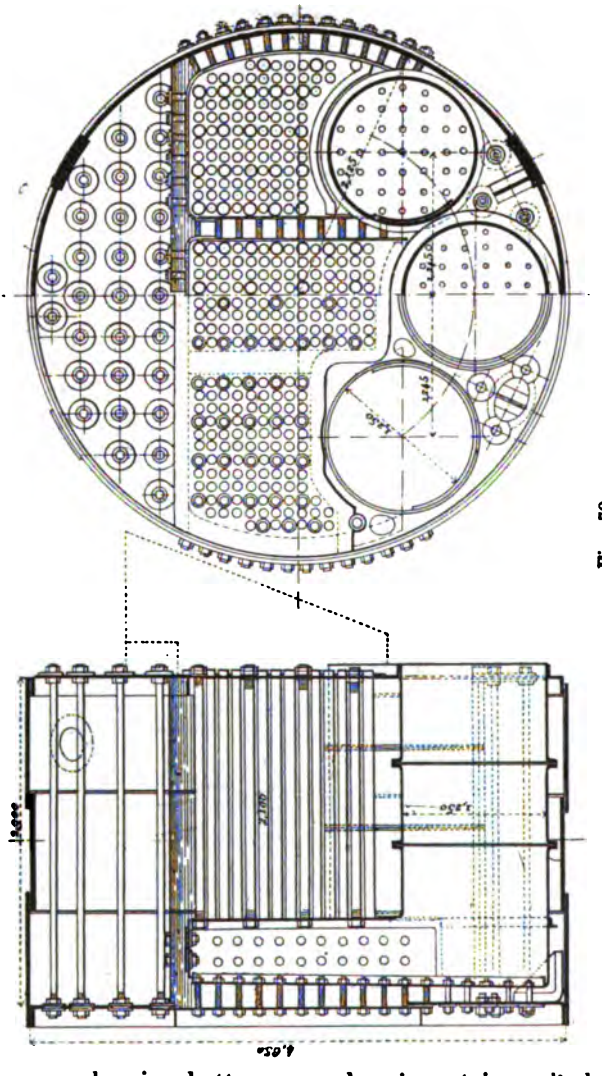


Fig. 79.

tion de noyer les jambettes avec du ciment jusqu'à la hauteur de la grille : aussi a-t-il été remplacé par le dispositif de la figure 79.

Tous deux possèdent les inconvénients des chaudières à foyers intérieurs auxquels s'ajoute l'obstruction que présente le faisceau

Digitized by Google

tubulaire au dégagement de la vapeur produite sur les foyers, car celle-ci ne peut gagner la surface libre du liquide, qu'en passant à travers les rangs nombreux et serrés des tubes : il en est de même pour les courants de convection qui se produisent sur les foyers et qui viennent se briser à la partie inférieure du faisceau tubulaire, ainsi empêchés de monter librement à la surface pour activer l'évaporation qui se produit par le plan de niveau d'eau.

Inconvénients des faisceaux tubulaires. — La figure 80 montre cette disposition défectueuse, qui fait que les espaces intertubu-

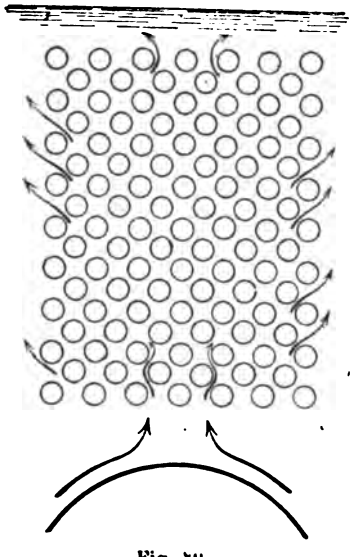


Fig. 80.

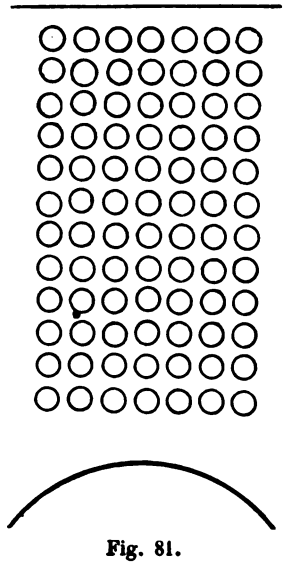


Fig. 81.

laires sont le plus généralement remplis de vapeur. En réalité, en dessinant ce type de chaudière, on a si peu pensé à assurer à la vapeur un libre dégagement vers la surface, qu'on a souvent disposé les groupes de tubes non pas en piles verticales comme le montre la figure 81, mais en quinconce comme le montre la figure 80, de telle façon que chaque tube puisse mieux intercepter la montée des bulles de vapeur qui s'élèvent des parties inférieures, et rester ainsi constamment enveloppé de vapeur. Les constructeurs qui commettent cette erreur, la présentent comme un avantage considérable, les bulles de vapeur brisées

Digitized by Google

par le passage au travers du faisceau tubulaire produisant d'après leur dire moins d'entraînement d'eau. Ceci n'est vrai que pour les projections d'eau, mais pour persévérer dans cette excellente voie, pourquoi ne pas mettre des écumoires ?

Le besoin d'augmenter la surface de chauffe en un espace donné, et diminuer ainsi le poids total d'une chaudière a conduit

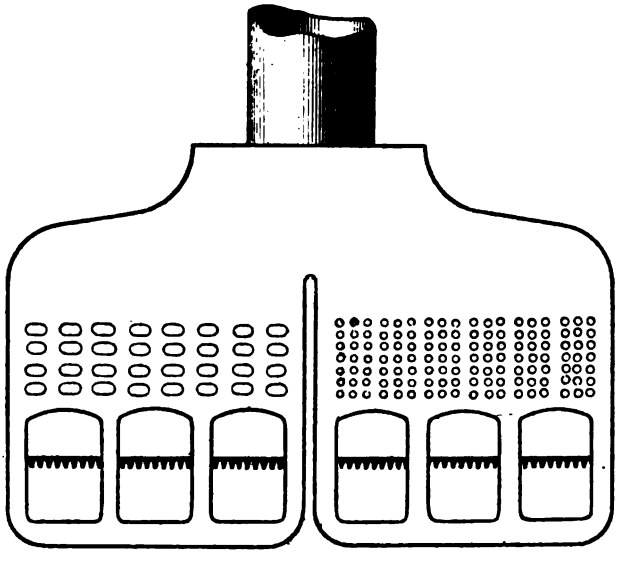


Fig. 82.

à l'emploi de tubes de petit diamètre en faisceaux compacts, mais ceux-ci comme nous l'avons vu sont loin de concourir à une augmentation de production.

M. Ch. Wye Williams[1] relate l'expérience suivante :

« La chaudière du bâtiment à vapeur le *Leeds* a fourni une preuve expérimentale des désavantages des petits tubes. Dans le but exprès de décider cette question, une moitié de cette chaudière fut construite avec des tubes de $0^m,076$ de diamètre et l'autre avec des tubes de $0^m,178$ sur $0^m,127$; voyez la figure 82.

« Voici le résultat de cette expérience : pendant plusieurs années, aucune espèce de réparation n'a été nécessaire dans la seconde moitié, tandis que la première a été une source conti-

[1] *La combustion du charbon.*

Digitized by Google

nuelle de désagréments et de dépense ; elle était, en outre, moins puissante comme générateur de vapeur. Beaucoup de petits tubes ont dû être renouvelés ; les lames d'eau étaient sujettes à se remplir d'incrustations, il fallut redresser la plaque de tête de l'avant sur laquelle les tubes étaient fixés, et river de nouveau les tubes ; un grand nombre de pièces et de boulons étaient de temps en temps introduits pour renforcer la plaque de tête de l'arrière et la maintenir à sa place.

« Ce fut aussi une confirmation pratique du fait, que la simple circonstance d'avoir une surface totale plus grande ne suffit pas pour produire un accroissement de vaporisation ; car la *somme de la surface des petits tubes* dans l'une des moitiés de la chaudière était *double de celle des grands tubes* dans l'autre. »

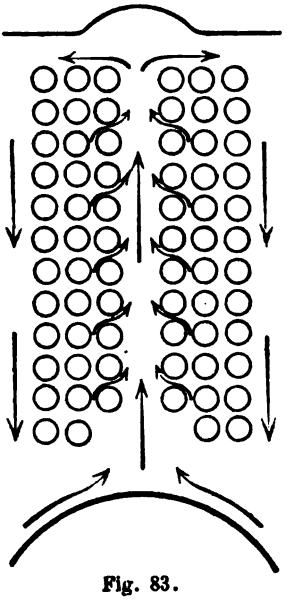


Fig. 83.

Il y a lieu ici de remarquer que la section de passage des gaz dans les gros tubes était de beaucoup supérieure à celle qu'offraient les petits tubes ; la combustion des foyers de gauche se faisait dans de meilleures conditions et c'est ce qui explique la plus grande efficacité d'une plus petite surface de chauffe.

La suppression d'une ou plusieurs rangées verticales de tubes à l'aplomb du foyer, comme le montre la figure 83 facilite considérablement le dégagement de la vapeur, augmente la puissance de vaporisation et améliore le rendement. Des essais ont été faits avec cette disposition, les résultats en ont été des plus satisfaisants, mais la routine a eu le dessus, et on continue à construire les faisceaux tubulaires aussi compacts que possible, tout comme s'il fallait hâter l'obstruction complète du faisceau par les dépôts qui s'y accumulent.

Matelas de vapeur des jambettes de foyer. — Lorsque les foyers sont placés côte à côte et ont leurs parois verticales planes, comme dans le cas de la figure 78, l'espace compris entre deux foyers se

Digitized by Google

remplit de vapeur, malgré les indications de l'appareil de niveau d'eau qui accuse une hauteur d'eau convenable dans la chaudière et dans ce cas les tôles de foyer se surchauffent et se détériorent.

Nous citerons de nouveau ici M. Ch. Wye Williams.

« Cet état de choses a été mis en évidence d'une manière frappante dans les chaudières du bâtiment à vapeur le *Great Liverpool*

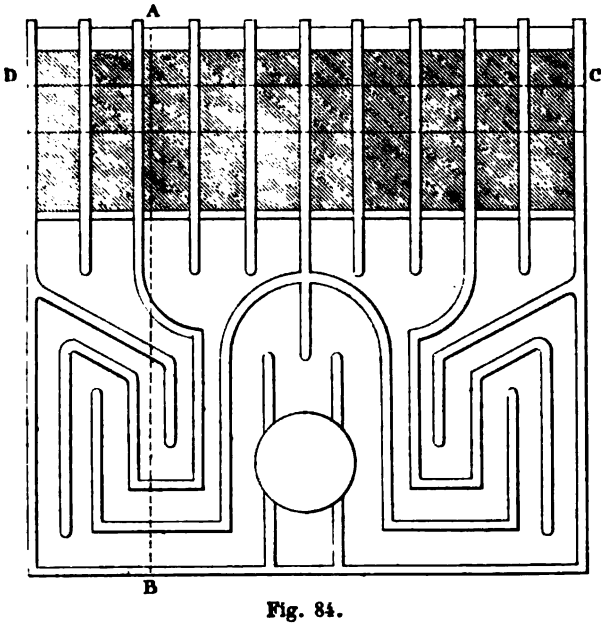


Fig. 84.

lors de son premier voyage à New-York, en 1842. Ayant remarqué que les tôles des côtés des fourneaux fuyaient constamment, que quelques-unes s'étaient déjetées, que d'autres s'étaient gercées, fendues, et même avaient été trouées par brûlure, quoique la *hauteur d'eau* dans la chaudière eût toujours été *suffisante*, le mécanicien soupçonna que quelque cause éloignait l'eau des tôles; dans le but de s'en assurer, il introduisit, par la façade de la chaudière, un tuyau en fer de $0^m,025$ de diamètre se prolongeant jusqu'à une lame d'eau placée entre deux fourneaux. Cet expédient fit découvrir la source du mal; car, bien que le tube de niveau indiquât une *hauteur d'eau suffisante à l'intérieur*, il ne sortit cependant que de la *vapeur* par le tuyau en fer, aussi longtemps que la chaudière fonctionna.

Digitized by Google

« Ce fait a prouvé d'une manière irrécusable que l'excès de chaleur des tôles était indépendant du service du chauffeur, et qu'il était le résultat d'une *circulation insuffisante* qui privait les profondes et étroites séparations entre les carneaux, d'une alimentation d'eau convenable ; il fut alors évident qu'il n'y avait

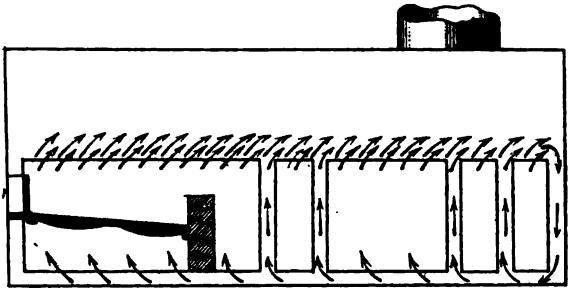


Fig. 85.

aucun remède pour ce mal, et une nouvelle chaudière devint nécessaire.

« La figure 84 est un plan de la chaudière où l'on voit les dix

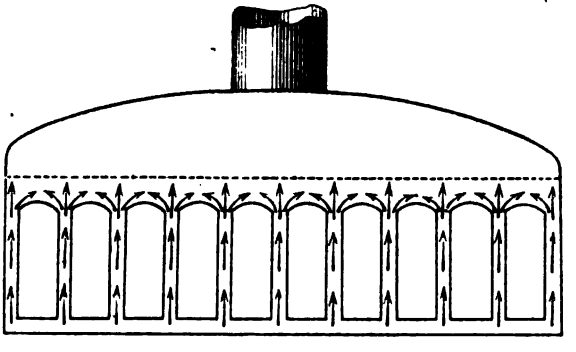


Fig. 86.

fourneaux et les étroites lames d'eau séparant les séries des carneaux étroits.

« La figure 85 est une section, suivant AB, dans laquelle sont indiquées les lames d'eau de $1^m,524$ de hauteur sur $0^m,102$ de largeur, et la direction suivant laquelle l'eau s'approche des tôles des côtés et du dôme des fourneaux.

« La figure 86 est une coupe faite à l'extrémité des fourneaux

Digitized by Google

de la chaudière, suivant CD ; elle représente les onze étroites lames d'eau, dans l'une desquelles avait été introduit le tuyau d'épreuve mentionné ci-dessus. »

Les foyers circulaires, tels qu'ils sont représentés à la figure 79, facilitent encore en une certaine mesure ces formations d'espaces de vapeur, qui se produisent dès que l'épaisseur de la lame d'eau qui mouille une surface de chauffe directe placée verticalement ou peu inclinée, a une épaisseur de 100 millimètres environ.

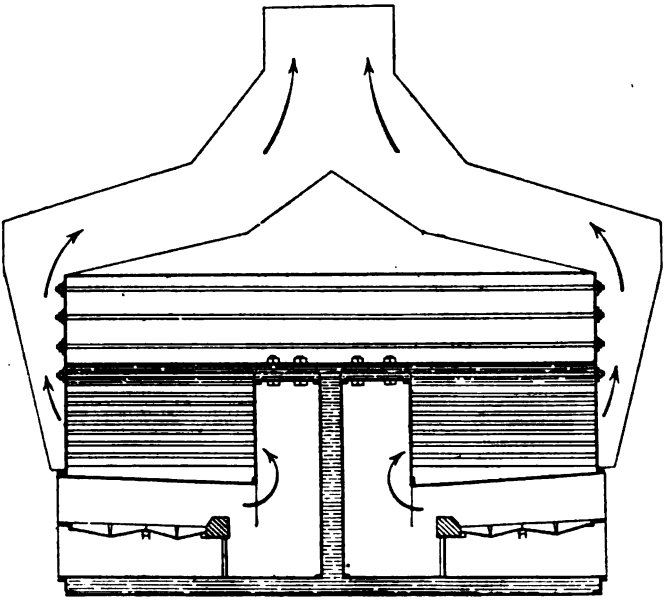


Fig. 87.

L'on voit à l'inspection de la figure que les espaces entre deux foyers voisins qui se vident d'eau en fonctionnement, se trouvent justement compris dans la zone limitée par un plan passant par l'axe du foyer du milieu et faisant un angle de 45° avec la grille ; les aplatissements des foyers par les côtés ne doivent nullement surprendre lorsqu'ils se produisent sur ces appareils.

La figure 87 représente le dispositif adopté souvent en marine avec les chaudières tubulaires, afin de diminuer le poids et l'encombrement : dans un même corps cylindrique sont placés symétriquement deux séries de foyers, chacune ayant sa chambre de combustion et son faisceau tubulaire ; le générateur est ainsi

Digitized by Google

chauffé simultanément à ses deux façades. Parfois la chambre de combustion est commune aux deux séries de foyers par la suppression de la lame d'eau médiane.

Chaudières tubulaires à foyer amovible. — On reproche à la disposition des générateurs des types Cornouailles, Lancashire et dérivés, de faire soumettre les fonds de ces appareils à des efforts considérables dus aux différences de dilatation du foyer et de l'enveloppe. Les foyers, qui se dilatent davantage à la partie supé-

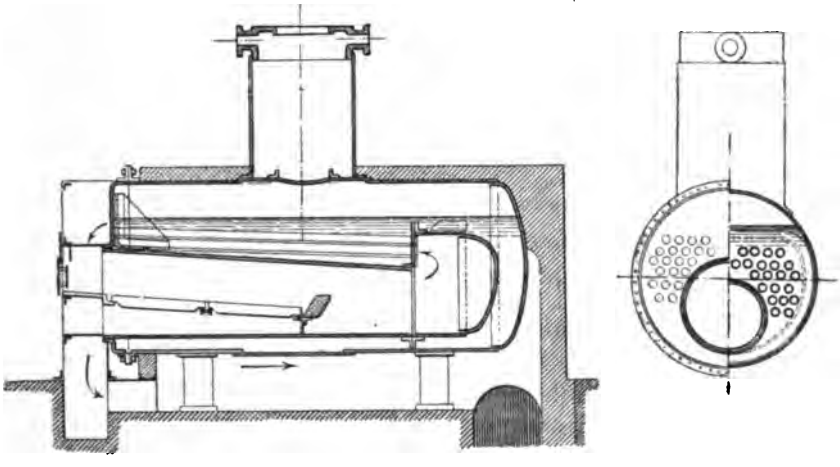


Fig. 88.

rieure, prennent une courbure très prononcée vers le haut, et l'emploi de dispositifs variés, tel que celui de joints élastiques pour l'assemblage des viroles du foyer, ne pare pas à cet inconvénient, qui n'est pas dû à une différence de dilatation entre le foyer et l'enveloppe, mais aux différences de dilatation qui existent entre les parties supérieures et inférieures du foyer et de son enveloppe (fig. 75).

Pour obvier à cet inconvénient on a établi le type représenté à la figure 88, dans lequel le foyer et le faisceau tubulaire, réunis à l'arrière par une chambre de combustion, sont complètement indépendants de l'enveloppe extérieure ; cette disposition a son point de départ dans les chaudières tubulaires de la marine où la nécessité d'avoir des chaudières courtes la fit imaginer.

Le foyer et le faisceau tubulaire sont fixés à la plaque qui

Digitized by Google

forme le fond avant du générateur et qui est boulonné sur la calandre.

Le principal avantage du système est de permettre, en déboulonnant simplement un joint, la sortie de l'appareil vaporisateur, c'est-à-dire les parties les plus exposées aux incrustations, et de procéder à leur nettoyage.

En effet un grave inconvénient des générateurs à faisceau tubulaire fixe et compact, à tubes non démontables, c'est la presque impossibilité de débarrasser les tubes des incrustations qui s'y attachent : parfois, et après un temps de marche relativement court, le faisceau tubulaire, se trouve noyé dans un seul bloc de dépôts. Le détubage complet, opération longue et coûteuse car elle entraîne le remplacement des tubes, est le seul remède qu'on puisse y apporter.

La faveur avec laquelle a été accueilli dans le monde industriel le type à foyer amovible a été très grande, et le dispositif de la figure 88 représente le générateur répandu par Thomas et Laurens.

Comme dans toutes les chaudières c'est la partie chauffée, le foyer principalement, qui occasionne les réparations et les chômages, on est amené dans les usines importantes à avoir des chaudières de rechange ; avec les chaudières à foyer amovible, il suffit d'avoir un ou deux vaporisateurs en magasin pour éviter l'installation des appareils complets de rechange et raccourcir la durée des chômages que nécessitent les réparations.

MM. Farcot et fils ont construit le type de chaudière à foyer amovible représenté par la figure 89. Tandis que dans les appareils de Thomas et Laurens les tubes reviennent s'attacher sur le fond avant, ici le foyer occupe seul la première moitié de la calandre et se continue par le faisceau tubulaire qui va déboucher à l'arrière. L'amovibilité est obtenue par deux joints, l'un extérieur à l'avant, l'autre intérieur à l'arrière.

Pour annuler les efforts dus aux différences de dilatations, le foyer est fixé au fond antérieur par une plaque à double emboutissage pouvant se déformer sous une plus grande dilatation de la partie supérieure du foyer.

En comparant le système Farcot à celui de Thomas et Lau-

Digitized by Google

rens, on voit que la suppression des tubes autour du foyer permet d'augmenter son diamètre, et par suite la surface de chauffe directe, et la largeur de grille. L'installation du faisceau sur toute la section du foyer donne lieu à un accroissement encore plus important de la surface de chauffe. Le vaporisateur arrive ainsi à atteindre une longueur irréalisable lorsque les tubes doivent revenir le long du foyer.

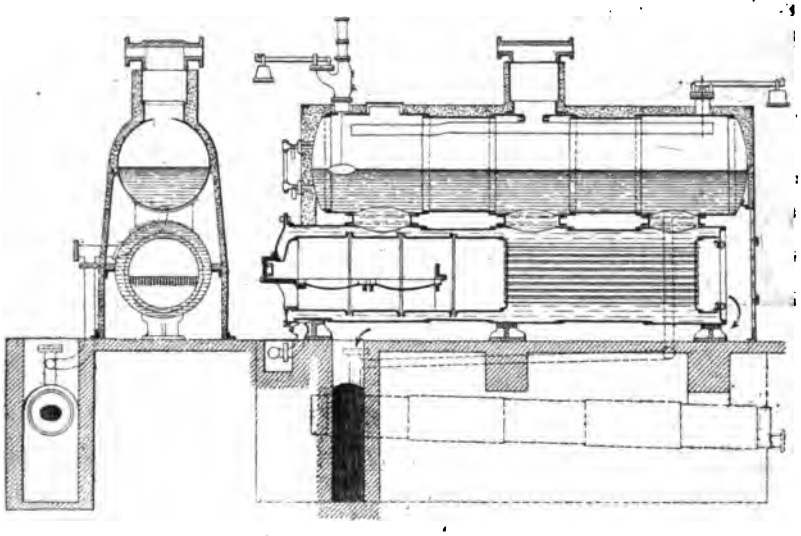


Fig. 89.

On renonce, il est vrai, à l'amovibilité par un seul joint, mais toute infériorité disparaît à cet égard si l'on double la puissance de l'appareil, c'est-à-dire s'il peut faire le même service que deux chaudières Thomas et Laurens, dont la longueur est limitée par celle de leurs tubes. Les réparations aux plaques tubulaires sont plus fréquentes avec la disposition de M. Farcot, par suite du choc direct des gaz; celles sur la plaque d'arrière seront plus faciles à exécuter que dans la chaudière Thomas et Laurens, où un démontage complet devient alors indispensable.

Ce dernier système conserve l'indépendance du vaporisateur et de l'enveloppe, mais s'oppose aux différences de dilatation du foyer; nous avons vu par quels artifices de construction les fâcheux effets de l'inégale température des différentes parties du foyer sont atténués dans celle de M. Farcot.

Digitized by Google

En résumé, le système Thomas et Laurens paraît d'autant plus avantageux que l'appareil est plus petit ; le contraire a lieu pour le système Farcot, qui finit par devenir seul possible pour de très grandes puissances.

Ces types de chaudières possèdent le grave inconvénient examiné plus haut en parlant des chaudières à foyer intérieur : inégalités de températures dues à l'absence de toute circulation de l'eau. Elles sont le plus souvent montées sans enveloppe en maçonnerie et sans carneau de retour à la partie basse, d'où aggravation de ce vice capital, qui n'est alors plus limité à une période plus ou moins longue après l'allumage, mais qui subsiste pendant tout le temps du fonctionnement. En outre dans le dispositif de Thomas et Laurens le dégagement de la vapeur et la montée des courants de convection sont contrariés par les tubes qui enveloppent le foyer à la partie supérieure. Cet inconvénient ne se présente pas dans la chaudière de M. Farcot : mais il y est remplacé par celui que provoquent les cuissards de communication avec le corps supérieur, et que nous avons examiné en parlant des chaudières à bouilleurs.

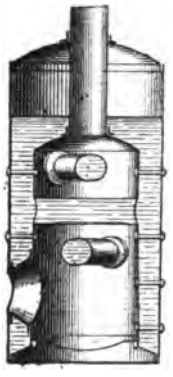


Fig. 90.

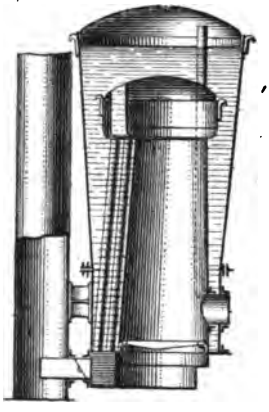
MM. Weyher et Richemond, de Pantin, construisent la chaudière à foyer amovible de Thomas et Laurens avec corps supérieur et cuissards de communication. On voit, d'après ce que nous venons de dire, que cette modification est loin d'être heureuse car elle réunit en un même appareil, les défauts communs et particuliers aux deux types de chaudière à foyer amovible que nous venons d'examiner.

Chaudières verticales. — Les chaudières verticales à foyer intérieur sont toujours d'une assez faible puissance. Elles sont tubulaires ou non tubulaires.

Si dans la figure 90 on suppose que les petits bouilleurs transversaux n'existent pas, on aura le modèle primitif de la chaudière *non tubulaire*. Plus tard, afin d'augmenter la surface

Digitized by Google

de chauffe, on a fait traverser le corps inférieur par un, deux, trois ou plusieurs bouilleurs contenant de l'eau, en créant ainsi la *chaudière verticale à bouilleurs croisés*. Dans presque toutes les chaudières verticales, la cheminée traverse la chambre de vapeur, ce qui occasionne la détérioration rapide de cette partie;



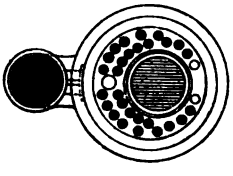
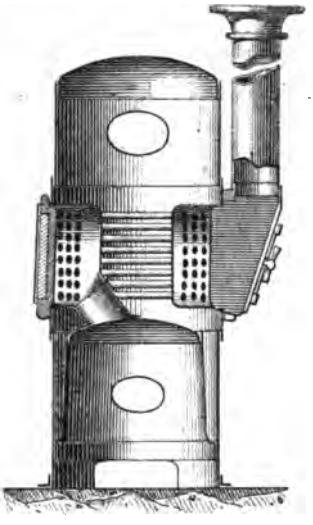


Fig. 91.



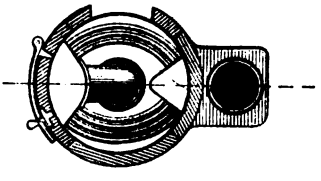


Fig. 92.

aussi a-t-on essayé de faire sortir la fumée par une tubulure latérale, restant sous l'eau et traversant la calandre, pour aboutir à la cheminée placée hors de la chaudière. Mais, comme toujours, cette idée rationnelle n'a pas été adoptée.

La figure 91 montre le dispositif Thomas et Laurens appliqué aux chaudières verticales : ici c'est la calandre évasée qui est amovible. Le vaporisateur, placé verticalement, est muni de tubes en fer, qui ramènent en retour l'air brûlé dans la boîte à fumée. La calandre extérieure est évasée afin d'obtenir une plus grande surface libre de l'eau et faciliter la circulation de l'eau et de la vapeur.

Digitized by Google

Les formes et les dispositions adoptées dans les chaudières verticales varient considérablement. Nous nous contenterons de signaler parmi les mieux conçues celle qui est représentée à la figure 92, construite par M. Paxman, de Colchester.

Les produits du foyer sortent de la boîte à feu par un conduit débouchant dans une chambre de combustion dont la section est à peu près celle d'un V. Cette chambre est rivée sur le corps de la chaudière. En réalité, c'est une boîte dont deux faces latérales convergent vers le fond, tandis que les deux autres faces sont parallèles.

Les premières, qui sont verticales, se couperaient en prolongement suivant l'axe des générateurs. Une seconde boîte, de forme analogue à la première, est placée au même niveau et en face de celle-ci. Les faces latérales de ces boîtes sont réunies par des tubes de fumée cintrés, comme l'indique la figure en plan.

La chambre de combustion et la boîte à fumée sont fermées par deux portes disposées de manière à permettre commodément le nettoyage des tubes.

Le rayon de courbure des tubes est plus grand que le rayon de la chaudière, de sorte que ceux-ci peuvent être facilement mis en place ou retirés séparément.

Les chaudières verticales, surtout quand elles ne sont pas à retour de flamme, ne donnent pas une aussi grande utilisation que les chaudières horizontales, et on ne comprend leur emploi qu'au point de vue du moindre emplacement qu'elles exigent, ce qui, dans certaines circonstances, peut les faire préférer.

Toutes les considérations relatives aux chaudières horizontales s'appliquent suivant le cas aux différents types de chaudières verticales, et il est inutile ici de revenir sur les critiques à formuler que le lecteur pourra reconnaître par un simple rapprochement.

Toutefois parmi les différents types de chaudières verticales, il en existe un que nous discuterons plus complètement : la chaudière avec tubes dits de circulation d'eau.

Chaudière Field. — Dans cette chaudière (fig. 93) on fixe à la

Digitized by Google

partie supérieure du foyer des tubes d'un faible diamètre, appelés communément tubes de circulation ou tubes *Field*, qui ont en réalité été inventés par Perkins dès 1831, et dont la figure 94 donne le détail. Ils se composent d'un tube vertical, fermé par le bas, dans lequel plonge un autre tube de diamètre beaucoup

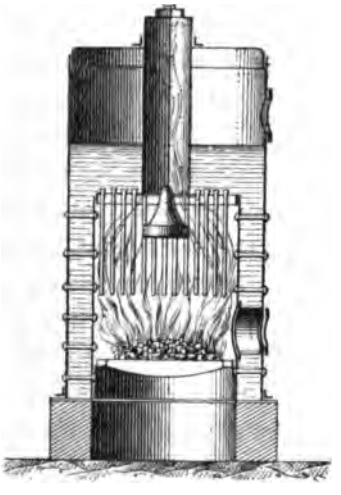


Fig. 93.

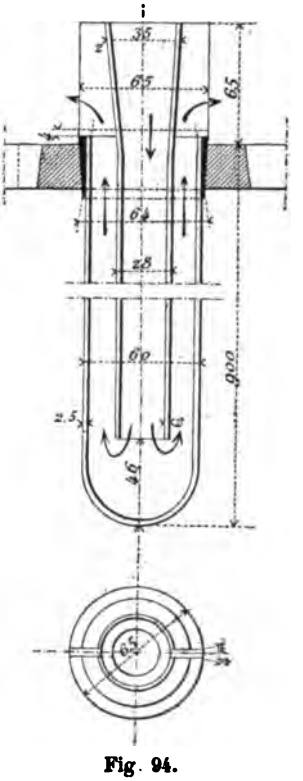


Fig. 94.

moindre, ouvert aux deux bouts. Le premier tube, qui vient pendre au-dessus de la grille, est fixé à sa partie supérieure par un dudgeonnage, ou porte une bague soudée, tournée cône, qu'un simple coup de marteau suffit à emmancher solidement dans un trou conique du ciel du foyer. Il a été toujours admis que la circulation de l'eau se faisait dans ces tubes suivant la direction des flèches ; que celle-ci, qui s'établit réellement pendant la mise en pression du générateur, se continuait et était activée par la formation des bulles de vapeur, et que ce courant acquérait une vitesse de plusieurs mètres par seconde,

Digitized by Google

capable d'entraîner non seulement les sels précipités, mais même des corps lourds, tels que la grenaille de plomb. C'est en effet ce qui se produit en chauffant de l'eau sur une lampe à alcool dans un tube en verre disposé avec un tube intérieur de retour. Mais le fonctionnement de ce dispositif dans la chaudière est loin de présenter les mêmes particularités, car la production de vapeur dans le tube en verre est insignifiante si on la compare à la quantité engendrée par une surface de chauffe directe d'un générateur industriel. En admettant qu'un mouvement ascendant aussi violent qu'on le suppose, se produise dans le tube extérieur, l'on est conduit à se demander comment l'eau qui doit parcourir en descendant le tube intérieur peut traverser la colonne annulaire montante extérieure, dont un effet, d'après toutes les lois physiques, serait au contraire l'entraînement dans la direction de son mouvement de la veine centrale. En réalité, dans le tube Field, l'ébullition se produit surtout à son extrémité inférieure, exposée au rayonnement de la grille : la vapeur pour se dégager (fig. 95) soulève et projette les deux colonnes d'eau qui la surplombent, remplit en entier le volume des deux tubes et se dégage à la partie supérieure ; immédiatement l'eau s'y précipite et les remplit de nouveau jusqu'à ce qu'il y ait nouvelle formation de vapeur et reproduction de la même série de phénomènes. La vaporisation dans les tubes Field est donc intermittente, ceux-ci fonctionnent absolument comme de petits geysers, et la circula-

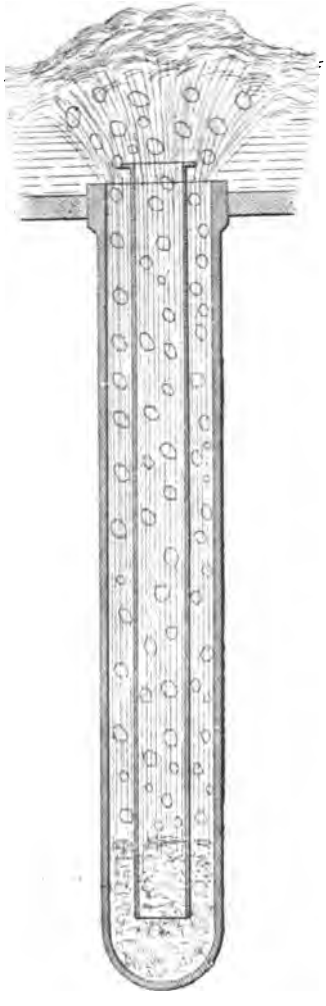


Fig. 95.

Digitized by Google

tion de l'eau tant prônée avec ce dispositif n'y existe nullement.

Si l'on fait chauffer de l'eau dans un récipient métallique (fig. 96) formé par une caisse cloisonnée en son milieu, la cloison s'arrêtant à quelques millimètres du fond et du niveau de l'eau, on peut amener à l'ébullition l'eau d'un compartiment, A par exemple, longtemps avant qu'il se produise de la vapeur dans le compartiment B. Les courants s'établissent comme l'indiquent les flèches sur la figure et la vapeur formée en A se dégage le long de la paroi extérieure : celle-ci, n'étant en contact qu'avec l'air, permet à la bulle de vapeur de se dégager ; mais le long de la paroi intermédiaire C il n'y a de formation de vapeur que lorsqu'elle est simultanée sur les deux surfaces en regard des compartiments A et B : l'excès de température que doit prendre la face côté A sur celle côté B pour transmettre la quantité de chaleur qui la traverse est inappréciable, et l'ébullition le long de cette lame ne se produit que lorsqu'elle a lieu simultanément des deux côtés. Dans le tube Field, la lame d'eau annulaire étant très faible, il ne peut y avoir dans celle-ci présence de vapeur que lorsque la colonne du tube intérieur a été également amenée à la température de l'ébullition ; toute circulation, en amenant dans le tube intérieur de l'eau nouvelle, n'aurait pour effet que d'empêcher la formation des bulles de vapeur dans l'espace annulaire. Mais bien avant que cet équilibre de température se produise, des bulles de vapeur se forment sur le bout inférieur du tube qui reçoit le rayonnement du foyer ; elles soulèvent les deux colonnes liquides, et par rupture d'équilibre il y a formation rapide de vapeur dans les colonnes liquides et projection du contenu des tubes. En faisant bouillir de l'eau dans un tube Field métallique à l'air libre, on constatera ce phénomène de

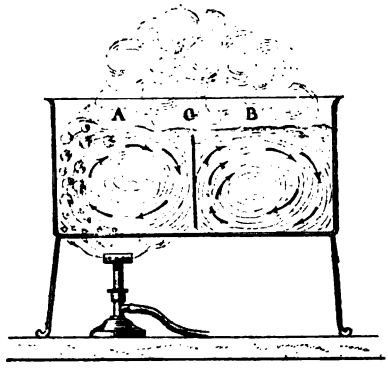


Fig. 96.

Digitized by Google

production intermittente, qui occasionne des projections d'eau considérables, ce qui a fait aussi croire à tort que toute circulation d'eau dans les chaudières donnait de la vapeur humide dans de très fortes proportions et favorisait les entraînements.

Fig. 97.

L'on voit que dans ces conditions le balayage des dépôts par la circulation était plus qu'illusoire, et c'est ce que la pratique a en effet révélé. Les figures 97 et 98 montrent des échantillons de tubes Field exposés en 1889 à Paris par les Associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur. On a voulu expliquer la présence des dépôts à la partie basse et la mise hors service des tubes de ce système, qui se brûlent tous très rapidement par le bout et doivent être très fréquemment renouvelés, par l'accumulation en cet endroit des matières en suspension pendant les arrêts ; mais dès qu'on allume le foyer, ces matières en suspension sont entraînées par les courants qui se produisent dans les tubes avant l'ébullition, et qui sont de sens inverse à ceux indiqués par la figure 93, c'est-à-dire ascendant par le tube du centre et descendant par l'espace annulaire. Le fonctionnement de ces tubes, tel que nous venons de l'indiquer, explique au contraire la formation de ces dépôts qui occasionnent la surchauffe. Cette dernière se produirait néanmoins toujours, même si l'appareil était alimenté à l'eau distillée. C'est en effet ce qui se passe dans la pratique ; les contractions auxquelles

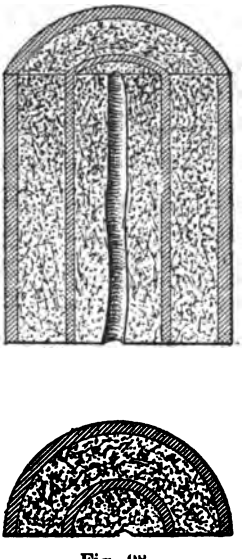


Fig. 98.

Digitized by Google

est soumis le métal, alternativement en contact avec la vapeur et l'eau, occasionnent des fissures qui se révèlent par des fuites et qui exigent le remplacement des tubes.

On a supposé enfin que l'installation d'un certain nombre de ces tubes dans un générateur réalisait une surface de chauffe exceptionnellement efficace ; cela a été une nouvelle erreur. Il suffit en effet de considérer que ces tubes n'offrent pas au rayonnement de la grille une surface beaucoup plus considérable que le ciel du foyer lui-même, et que c'est surtout par le contact avec les gaz chauds que la surface tubulaire peut être utilisée à la transmission de la chaleur. Le diagramme de la page 93 nous montre le peu d'efficacité que l'on a pu ainsi réaliser, et les expériences pratiques confirment pleinement ces déductions théoriques.

M. Daniel Stapfer, constructeur à Marseille, a fait en 1875 avec M. Baret, Ingénieur de la Compagnie des Docks, des expériences très intéressantes sur l'efficacité des tubes Field comme surface de chauffe. Ces expériences ont été réalisées sur une chaudière verticale à tubes de circulation ayant une surface de chauffe de 6 mètres carrés ; la surface tubulaire de 3 mètres carrés était donc la moitié de la surface totale.

La puissance de vaporisation a été d'abord mesurée sur la chaudière disposée comme il vient d'être dit, ensuite en enlevant tous les tubes Field et en tamponnant les trous du ciel du foyer.

L'expérience a été faite pour chaque cas dans les mêmes conditions, avec une durée de trois heures, et on a produit :

Pour la chaudière avec tubes Field	611	kilog. de vapeur
Pour la même chaudière, sans tubes Field. .	520	— —

La puissance de vaporisation des tubes Field n'était donc que de 10 litres d'eau par mètre carré et par heure, contre 60 environ par mètre carré de la surface de chauffe du corps cylindrique formant foyer.

A la suite de ces expériences, M. Stapfer répare les chaudières auxiliaires de bateau ayant des tubes Field, en supprimant ceux-ci, et le service de ces appareils se continue dans les mêmes conditions que précédemment.

Digitized by Google

Le seul avantage de ces tubes à circulation illusoire est de permettre une mise en pression très rapide ; aussi les générateurs qui en sont munis sont-ils employés avec succès pour les pompes à incendie, mais ils ne peuvent être considérés comme bonnes chaudières d'usine, et dans aucun cas il n'y a lieu de modifier les dispositions connues ou adoptées des chaudières industrielles pour y annexer des tubes Field. Au début, séduit par les avantages de la circulation qu'on croyait provoquer dans ces tubes, on en a placé dans les foyers des chaudières de locomotives, mais on a été forcé de les supprimer avec un empressement plus grand que celui mis pour les adopter.

Chaudière de locomotive. — La figure 99 représente la forme la plus simple d'une chaudière type locomotive construite pour

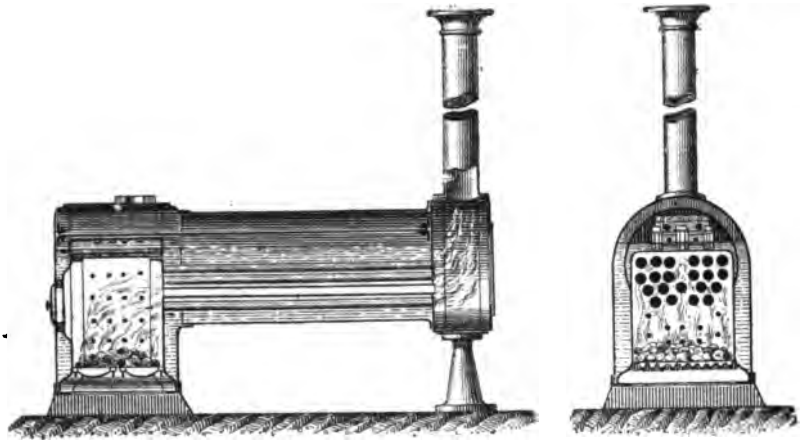


Fig. 99.

fonctionner comme chaudière fixe ; cet ensemble, tout en ne donnant pas les formes de détail particulières adoptées pour les machines locomotives, représente toutefois les parties essentielles et caractéristiques de ce genre de générateur de vapeur. Dans les applications aux chemins de fer le faisceau tubulaire surtout a une plus grande importance et est beaucoup plus compact.

Ce générateur se compose d'un foyer vertical à section rectangulaire, placé dans une enveloppe extérieure qui se raccorde à

Digitized by Google

un cylindre horizontal traversé dans toute sa longueur par le faisceau tubulaire.

Les côtés et le ciel du foyer, étant formés par des surfaces planes, doivent être entretoisés avec le plus grand soin.

Au repos le foyer se trouve ainsi environné d'eau de tous côtés; les produits de la combustion en quittant le foyer pénètrent dans le faisceau tubulaire, à l'extrémité duquel se trouve une chambre, appelée boîte à fumée, qui se raccorde à la cheminée.

Sur les chemins de fer la quantité de vapeur produite devant toujours être le maximum qu'on peut obtenir d'une surface de chauffe donnée sans sacrifier au rendement, on emploie le tirage artificiel pour effectuer la combustion; la vapeur qui s'échappe des cylindres moteurs est amenée par un tuyau qui débouche au bas de la cheminée, et le tirage est considérablement augmenté par le jet de vapeur qui s'y produit ; en outre la boîte fermée qui forme cendrier s'ouvre en avant et l'air y est refoulé par la marche de la machine. L'on peut ainsi réaliser dans de bonnes conditions la combustion de 250 à 300 kilogrammes de houille par mètre carré de surface de grille et par heure.

La vaporisation apparente atteint dans ces chaudières le chiffre de 40 à 50 litres d'eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe totale et par heure; mais la quantité d'eau entraînée varie de 25 à 40 p. 100.

Dans ce type de chaudière la combustion des gaz doit s'effectuer complètement dans la boîte à feu, car ils s'éteignent dès qu'ils pénètrent dans les petits tubes. Si, pour augmenter la surface de chauffe, on augmentait le nombre de tubes, et que la section totale fût plus grande que celle qui est nécessaire à l'écoulement des produits de la combustion, ceux-ci se répartiraient inégalement entre les tubes, en passant de préférence par les tubes supérieurs du faisceau.

Le faisceau tubulaire dans ces chaudières n'a pas l'inconvénient des types tubulaires fixes ou marins, car la plus grande production de vapeur, celle du foyer, se dégage directement sans avoir à le traverser ; mais, tout comme dans les autres appareils tubulaires, il est impossible de débarrasser le faisceau des dépôts qui s'y accumulent sans recourir au détubage.

Digitized by Google

Dans les chaudières de machines locomotives les parois verticales du foyer se détériorent rapidement, surtout la plaque tubulaire; le dégagement de la vapeur sur cette dernière est très difficile à cause de l'insertion des tubes et la plaque se surchauffe d'une façon constante. Quant aux autres parois latérales, la vapeur s'y accumule et y forme matelas, comme nous l'avons expliqué page 49. L'absence de toute circulation d'eau le long de ces parois favorise en outre l'établissement d'un espace rempli complètement parla vapeur entre la face de la boîte à feu et la paroi correspondante de l'enveloppe extérieure. En plaçant un robinet sur l'enveloppe du foyer et en le prolongeant par un tube près de la paroi chauffée, ce robinet ouvert pendant le fonctionnement du générateur ne donnera passage qu'à de la vapeur. Un indicateur de niveau à tube en verre, placé comme à la figure 100 sur l'enveloppe du foyer, montrera l'existence de ces cloisonnements de vapeur entre les deux enveloppes, à cause de la grande activité de production des surfaces du foyer. C'est le remplacement de la vapeur par l'eau dans ces espaces, qui produit le brusque abaissement du niveau de l'eau dans le générateur dès que la production s'arrête. Cette différence de niveau s'accuse même très net-

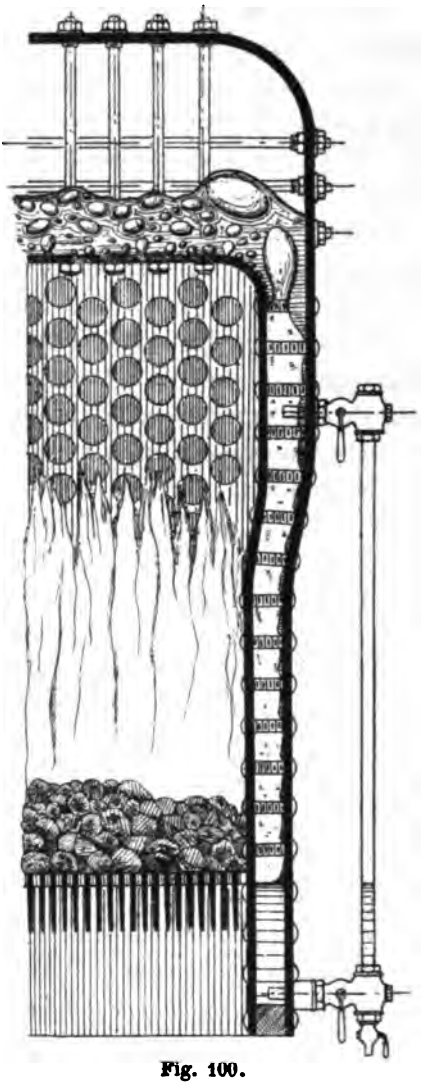


Fig. 100.

Digitized by Google

tement pour de simples variations dans l'allure de la chaudière.

Ce phénomène bien connu des chauffeurs conduisant des chaudières locomotives ou multitubulaires est par eux appelé gonflement de l'eau.

Nous aurons l'occasion d'y revenir plus loin en parlant des chaudières à tubes d'eau, mais nous insérons ici à titre de renseignement les valeurs des dilatations cubiques de l'eau, celles-ci étant supposées constantes quelle que soit la pression, ce qui n'est pas le cas. Les chiffres du tableau au-dessus de 100° sont donc supérieurs à la réalité, et en les appliquant au calcul de la variation de hauteur du plan d'eau par dilatation, ils donneront pour la surélévation du niveau une valeur plus grande que celle qui a effectivement lieu.

Températures.	Dilatations cubiques par 1000 litres.
100° C.	43 litres
120	59 —
140	79 —
160	101 —
180	126 —

Il n'est pas étonnant, dans ces conditions, que les parois du foyer soient vouées à une destruction rapide et certaine. Pour y assurer la présence de l'eau on a eu recours à différents dispositifs qui n'ont pas donné les résultats qu'on en attendait et qui ont été abandonnés.

Parmi ceux-ci l'un consistait en des cloisons séparatrices formées par des feuilles métalliques enfilées sur les entretoises et maintenues à égale distance de la paroi du foyer et de celle de l'enveloppe ; leur but était de séparer et canaliser les courants, l'un d'eau descendant le long de l'enveloppe du foyer et l'autre de vapeur et d'eau ascendant le long du foyer. Une autre disposition consistait à réunir la partie basse du foyer au corps cylindrique par un tuyau de retour d'eau. Enfin dans le foyer même on a placé des tubes en forme de L, insérés dans les parois par la branche courte horizontale et dans le ciel par la branche verticale, dans laquelle on supposait créer un violent courant ascendant qui aurait appelé l'eau dans les espaces compris entre

Digitized by Google

le foyer et son enveloppe. Tous ces dispositifs ont dû être abandonnés, car loin d'améliorer le fonctionnement des générateurs, ils le gênaient considérablement. Dans la discussion relative au fonctionnement des chaudières multitubulaires nous verrons quelles sont les causes qui ont empêché la réalisation du but qu'on se proposait.

La présence effective de l'eau sur les parois verticales des foyers des locomotives empêcherait leur surchauffe et leur détérioration rapide, et amènerait de ce chef une économie considérable dans les frais de la traction, en assurant à cette partie du générateur une vie aussi longue qu'au corps cylindrique et à l'enveloppe du foyer.

Digitized by Google

CHAPITRE XIII

LES CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES

Chaudières à tubes d'eau. — Dans tous les types de chaudières que nous avons examinés, sauf celle à tubes Field, l'eau et la vapeur sont contenues dans une enveloppe métallique simple, ou traversée par des carneaux ou des tubes dans lesquels circulent les produits de la combustion ; le volume de l'eau est important par rapport à la surface de chauffe.

La chaudière multitubulaire au contraire se compose essentiellement d'un faisceau de tubes dans lesquels se trouvent l'eau et la vapeur, les produits de la combustion cheminant dans les espaces ménagés autour des tubes. L'enveloppe métallique soumise à la pression de la vapeur et contenant les tubes disparaît, le faisceau tubulaire étant généralement placé dans des espaces maçonnés ; la vapeur produite dans le faisceau tubulaire se dégage dans un réservoir cylindrique de diamètre relativement petit, et qui est, dans la plupart des cas, mis à l'abri du contact des produits de la combustion. Dans ces générateurs, le volume de l'eau par rapport à la surface de chauffe est en principe très faible, et l'emploi d'éléments constitutifs de petites dimensions a permis d'aborder les hautes pressions de vapeur dont l'emploi tend à se généraliser dans toutes les branches de l'industrie. Ce type de chaudières a permis de réaliser un très grand progrès dans l'emploi économique de la vapeur et a pris un développement considérable qui va en augmentant d'une façon très caractéristique.

Dans l'examen de ces appareils il y a lieu de les séparer en

Digitized by Google

deux classes bien distinctes, l'une basée sur la non circulation de l'eau dans le faisceau tubulaire, l'autre, la plus nombreuse, sur une circulation supposée très active. En général toutes ces chaudières sont désignées par le nom de leur inventeur ou de leur constructeur.

Chaudières multitubulaires sans circulation. — Le principe qui a donné origine à ce type de générateur, c'est la production instantanée de vapeur, en quantité exactement proportionnée à la dépense. Mais de nombreux inconvénients s'opposaient à la réalisation de ce programme, car les surfaces métalliques portées à haute température et ne recevant qu'un mince filet d'eau étaient vouées à une destruction rapide et certaine.

Parmi les nombreux ingénieurs qui ont abordé l'étude de l'établissement d'un générateur dans ces conditions, M. Belleville a été le seul qui ait donné au problème une solution pratique, et les chaudières qui portent son nom sont actuellement fort répandues en France.

Générateur Belleville. — Cet appareil se compose (fig. 101) d'un serpentin, relié à la partie supérieure à un réservoir de vapeur cylindrique et à la partie inférieure à un collecteur d'alimentation qui est réuni par un tube de retour au réservoir de vapeur supérieur. Le plan de niveau d'eau normal est tenu vers le milieu de la hauteur du serpentin ; l'alimentation se fait dans le réservoir supérieur et l'eau injectée, avec celle entraînée par la vapeur dans le réservoir, descendent par le tube de retour au collecteur d'alimentation. Plusieurs serpentins placés côte à côte forment un générateur, dont la puissance varie avec le nombre d'éléments et le diamètre, le nombre et la longueur des tubes qui composent un élément.

La conduite et le fonctionnement de ces appareils sont fort délicats : l'alimentation et la combustion, devant être toujours proportionnelles à la consommation de vapeur, sont toutes deux contrôlées par des appareils automatiques ; l'alimentation par un flotteur placé dans un récipient formant clarinette pour le tube indicateur du niveau de l'eau, et qui commande la soupape de prise de

Digitized by Google

vapeur de la pompe alimentaire spéciale qui fait partie de ces

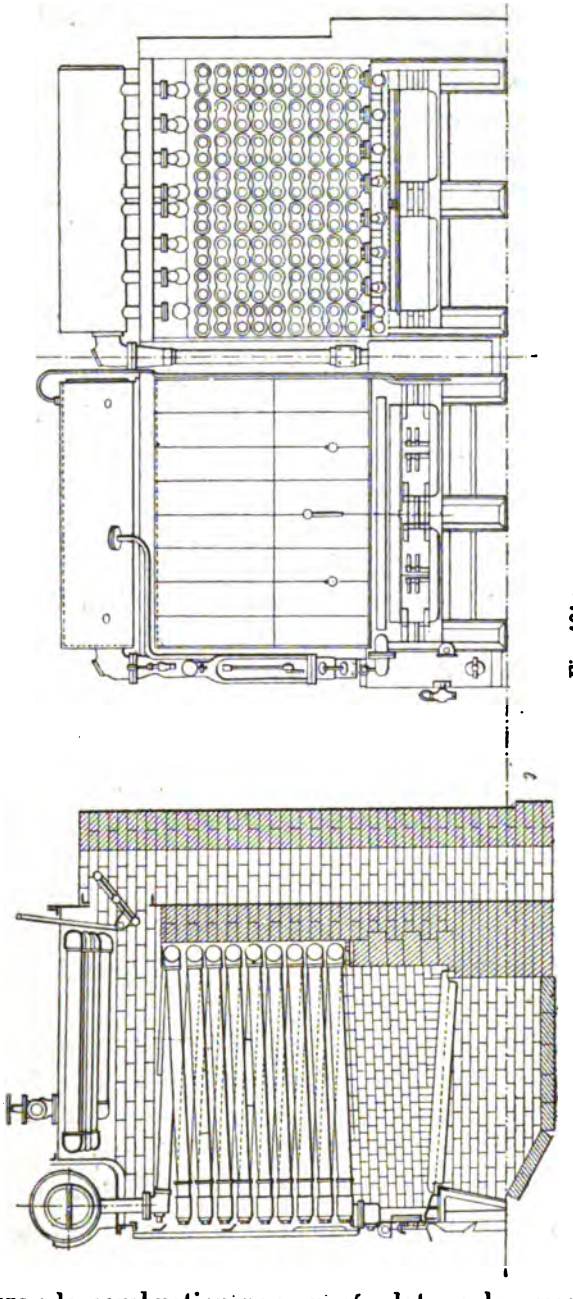


Fig. 101.

générateurs ; la combustion par un régulateur de pression à res-

Digitized by Google

sorts qui actionne le registre, et qui peut être réglé pour que la fermeture ou l'ouverture complète de ce dernier se produisent pour un écart de pression déterminé.

Avec quelque précision que puissent fonctionner le régulateur de combustion et celui d'alimentation, leur effet n'est pas de maintenir constantes la pression ou la hauteur du niveau, mais plutôt d'entretenir un état continuel d'oscillation entre des limites déterminées. A ce point de vue, il n'y aurait pas intérêt à exagérer la sensibilité des régulateurs.

La mise en pression de ces appareils est rapide, mais l'entraînement d'eau avec la vapeur est très important, malgré le faisceau de tubes surchauffeurs placé à la suite du réservoir et que la vapeur traverse avant d'entrer dans la conduite, et la chute de pression de 4 à 5 kilogrammes et parfois plus produite par un détendeur placé à l'origine de cette conduite (voir p. 68). En effet les bulles de vapeur qui se produisent dans les tubes s'accumulent à la génératrice supérieure et ne pouvant cheminer horizontalement pour se dégager, car l'eau n'a aucun mouvement initial qui puisse les entraîner, elles forment des cylindres de vapeur occupant tout le tube et chassant l'eau se trouvant devant eux dans le réservoir de vapeur.

Les courants de convection dans ces appareils se localisent dans les tubes, et l'intérieur de ceux-ci n'offrant pas de surface libre importante à l'évaporation, la rapidité de la transmission de la chaleur à l'eau et l'efficacité de la surface de chauffe sont notablement diminuées ; ce n'est que lorsque l'eau est projetée dans le réservoir de vapeur qu'elle peut s'y étaler en nappe, et faciliter l'évaporation correspondante à la quantité de chaleur latente absorbée.

Le frottement de la colonne fluide qui parcourt le tube en serpentin est considérable, car elle doit changer 36 fois de direction par coudes brusques dans les serpentins à 18 tubes. Dans ces conditions, la présence de l'eau dans les tubes de coup de feu n'est pas assurée et ceux-ci se surchauffent, conséquence inévitable dans le cas d'une augmentation soudaine dans la consommation de vapeur.

Le nettoyage des incrustations dans ces appareils est long et

Digitized by Google

laborieux ; aussi l'emploi des hautes pressions et l'injection de l'eau d'alimentation dans la vapeur, permettent la précipitation presque immédiate des carbonnates et d'une grande partie des sulfates ; un récipient appelé déjecteur est placé au bas du tuyau de retour pour recueillir les dépôts précipités. Cette disposition, quoique d'une efficacité incomplète, diminue la quantité de sels entraînés par l'eau dans les tubes vaporisateurs.

L'obturation des ouvertures placées en regard de chaque tube pour en permettre l'inspection intérieure est défectueux ; elle n'est pas autoclave, le bouchon étant pressé contre la boîte par un boulon, lequel doit annuler l'effort exercé par la vapeur sur la surface du bouchon qui correspond à l'ouverture dans la boîte de raccordement. Au repos du générateur cet effort de serrage est augmenté d'un effort encore plus considérable dû à la différence d'allongement (2 500 kilogrammes par centimètre carré, pour un millième de la longueur et pour 100° de différence de température). Sous l'influence de ces efforts, les boulons de serrage cassent facilement, le tampon est projeté et la vapeur et l'eau se précipitent par l'ouverture ainsi démasquée. Cet accident est beaucoup plus grave pour le personnel de service que celui de la déchirure d'un tube s'il ne se produit pas au moment d'un chargement ; le volume d'eau contenu dans l'appareil est très faible, le rapport entre les sections de la veine fluide et de la déchirure du tube est petit et les effets dynamiques ne sont pas importants, tandis qu'en cas de projection de tampons les portes de nettoyages s'ouvrent et le personnel atteint par le tampon ou brûlé par la vapeur est voué à une mort certaine.

Un des avantages réclamé en général pour toutes les chaudières multitubulaires, c'est la division des éléments constitutifs d'un appareil, ce qui permet en cas d'accident le remplacement rapide et peu onéreux de l'élément avarié, en général un tube de coup de feu.

Dans la chaudière Belleville, le tube étant vissé dans deux manchons insérés dans les boîtes, il faut couper ceux-ci au préalable pour enlever le tube brûlé et le remplacer. Cette opération se fait en un temps relativement court et l'appareil peut être

Digitized by Google

remis en fonctionnement avec une dépense beaucoup moins importante que celle de la réparation d'un accident de même nature à une tôle de chaudière cylindrique.

La puissance normale de vaporisation apparente des générateurs Belleville est de 20 litres d'eau par mètre carré de surface de chauffe et par heure et leur rendement apparent de 7 à 8 litres d'eau vaporisée par kilogramme de houille brûlée.

Chaudière Root. — Ce type de générateur multitubulaire sans circulation d'eau est très répandu en Amérique et en Angleterre. La figure 102 représente cet appareil tel qu'il est établi actuellement avec les modifications qui y ont été apportées par son constructeur, M. Knap. A l'origine le niveau de l'eau était maintenu comme dans la chaudière Belleville à la moitié de la hauteur du faisceau tubulaire : il est actuellement remonté à la partie supérieure de ce faisceau, mais comme l'indicateur est raccordé par la prise du haut au réservoir de vapeur et pour celle du bas au tube de retour, il n'indique que la hauteur de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus du tube servant d'alimentation et de vidange à l'arrière. Les extrémités avant et arrière des tubes sont réunies deux à deux horizontalement par des boîtes de communications, chaque boîte communiquant avec celle qui est située au-dessus d'elle par un raccord courbe ; à l'arrière ces boîtes et ces communications distribuent l'eau aux tubes, à l'avant elles servent au dégagement de la vapeur. Deux séries de quatre tubes de moindre longueur sont placées sur les côtés de la grille ; cette disposition, qui permettrait une meilleure utilisation de la chaleur rayonnée par le foyer, ne saurait être critiquée si par la disposition d'accouplement des tubes on ne forçait la vapeur à descendre pour pouvoir se dégager. Les difficultés semblent avoir été créées à loisir dans ce type de chaudière pour entraver le dégagement de la vapeur ; aussi celle-ci refoule l'eau vers la partie basse des tubes. Il est vrai que l'inventeur s'appuie sur le rétrécissement des passages de vapeur, comme sur un avantage qui lui permet d'obtenir de la vapeur sèche : celle-ci doit même être surchauffée dans la partie avant des tubes du bas qui est exposée au rayonnement du foyer

Digitized by Google

et qui est en fonctionnement normal complètement dégarnie d'eau. Les projections périodiques d'eau dans le réservoir de vapeur du

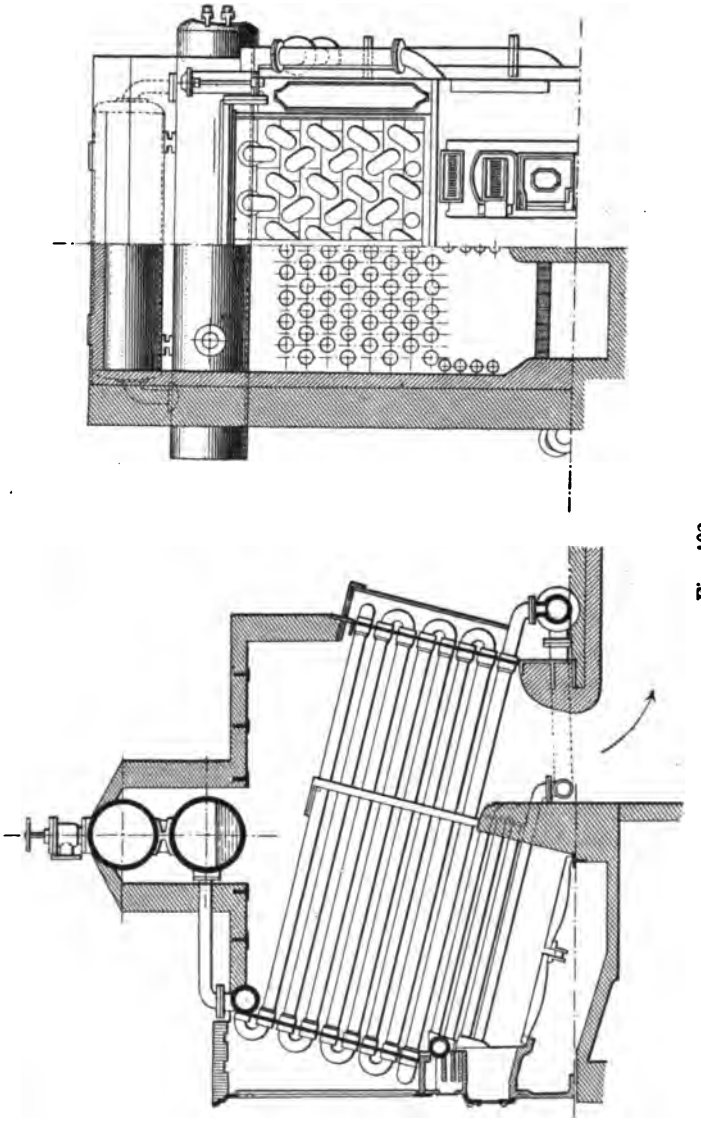


Fig. 102.

générateur Belleville ne se produisent pas avec ce dispositif, et comme celles-ci ont une influence directe sur la quantité de vapeur produite, la puissance de vaporisation des surfaces de chauffe doit en être diminuée. Effectivement l'allure normale de

Digitized by Google

ces générateurs est de 12 à 15 litres d'eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe. Malgré cette allure lente, à cause de ce qui précède, les tubes de coup de feu fatiguent et se surchauffent plus facilement que dans l'appareil Belleville. Le rendement ne dépasse pas 7 litres d'eau vaporisée par kilogramme de houille brûlée, mais la quantité d'eau entraînée étant moindre que dans les Belleville le rendement en travail est supérieur à celui qu'on obtient avec ce dernier type.

Le système de fermeture des ouvertures en regard des tubes n'échappe pas aux critiques formulées page 229 : le nettoyage intérieur et le remplacement d'un tube sont facilités par l'amovibilité des fermetures aux deux extrémités des tubes.

Chaudière Serpollet. — Quoique cette chaudière ne soit pas à proprement parler une chaudière industrielle nous croyons toutefois devoir ici la mentionner.

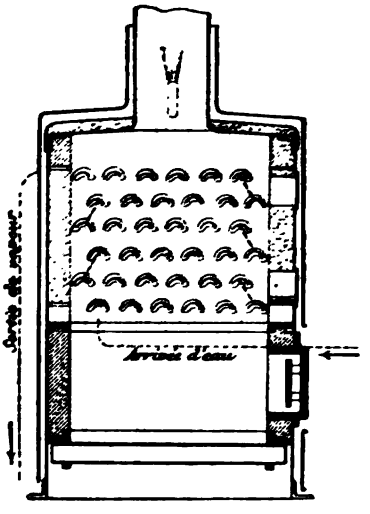


Fig. 103.

Au début, ces générateurs étaient formés par des tubes en acier de 10 millimètres d'épaisseur, complètement aplatis, pour ne laisser qu'un intervalle capillaire, et roulés en spirale. Ils étaient protégés contre la déformation par un solide entretoisement. Mais ils ne sont devenus d'un emploi pratique que lorsqu'on a pu assigner au vide intérieur une régularité parfaite.

Ce résultat a été obtenu par l'emploi du grès emprisonné entre les parois des tubes, conservant ainsi la régularité du vide intérieur jusqu'à l'achèvement de la fabrication ; à ce moment, on expulse le grès qui, du reste, coule du tube comme un fluide.

Une pompe à débit variable avec la consommation injecte l'eau à vaporiser à l'extrémité basse du serpentin, et la vapeur qui se dégage à l'autre extrémité se rend au moteur. Le type le plus récent se compose d'une série de tubes droits (fig. 103) à section

Digitized by Google

en forme de haricot disposés parallèlement et superposés en quinconce. Les extrémités réunies alternativement forment de l'ensemble un système en serpentin continu.

Cet appareil paraît être appliqué avec succès aux voitures automobiles, mais ne peut être utilement employé que pour de très faibles puissance.

Son fonctionnement est délicat et l'espace infiniment petit ménagé au courant fluide qui le traverse s'obstrue facilement, même avec l'emploi exclusif de l'eau distillée : l'appareil entier est alors hors de service, le lavage à l'eau acidulée du canal capillaire indiqué par l'inventeur ne pouvant être recommandé. En outre, la pression est irrégulière, variant dans des limites très étendues à chaque injection, et la vapeur est trop surchauffée, ce qui est un inconvénient. Cette tentative toutefois mérite d'être signalée.

Chaudières multitubulaires dites à circulation. — Tous les générateurs de cette classe, dont le nombre augmente chaque jour, peuvent être ramenés à quelques types principaux, qui sont les plus répandus, tels que les chaudières Babcock et Wilcox, de Naeyer et Collet, dont tous les autres appareils multitubulaires ne sont que des imitations, avec quelques petites modifications de détail qui laissent subsister l'agencement substantiel de l'appareil originaire.

Nous les passerons en revue avant d'aborder la discussion du principe fondamental sur lequel elles reposent.

Cette classe de chaudières doit son origine aux travaux de Jacob Perkins, qui le premier en 1831 obtint en Angleterre un brevet pour des perfectionnements aux appareils à vapeur, dans lequel il insistait sur les avantages qu'on obtenait dans la production de la vapeur en forçant l'eau à circuler rapidement sur les surfaces de chauffe directe. En 1839 il prit un brevet pour un appareil complet basé sur ce principe et intitulé : *Appareil pour transmettre la chaleur par une circulation d'eau*, et qui est encore appliqué avec le plus grand succès pour le chauffage des locaux habités. Il préconisait le même système pour les générateurs de vapeur industriels.

Digitized by Google

Pour avoir une idée nette de l'appareil de M. Perkins, imaginons un tube de fer de 12 millimètres de diamètre intérieur, tourné en hélice dans un foyer, et une hélice semblable dans une chaudière pleine d'eau, placée à côté ; supposons que les parties supérieures et inférieures des hélices communiquent par des tubes de même diamètre, et enfin qu'à la partie supérieure du circuit il y ait un cylindre d'un plus grand diamètre, hermétiquement fermé, dans lequel s'effectue la dilatation de l'eau quand elle est échauffée. Il est évident que, les deux hélices étant pleines d'eau, quand le feu sera en activité, l'eau circulera dans le circuit ; elle prendra de la chaleur dans le foyer, pour la porter dans la chaudière. Si le foyer consomme une quantité suffisante de combustible, et si les surfaces des tuyaux d'absorption et d'émission ont une assez grande étendue, le générateur pourra produire telle quantité de vapeur que l'on voudra.

Cette disposition avait l'avantage de supprimer les incrustations sur les surfaces de chauffe directe puisque c'était toujours la même eau qui circulait dans les hélices génératrices ; elle supprimait l'explosion de la chaudière proprement dite par l'action directe du feu et ne laissait subsister que les chances d'explosion résultant d'un excès de pression dans les tubes générateurs, fort improbables, car ces tubes de petit diamètre avaient une grande épaisseur et offraient une grande résistance, et de faible importance comme accident, à cause de la petite quantité d'eau renfermée dans ces tubes.

M. Perkins construisit un certain nombre d'appareils industriels établis sur ce principe, mais ils furent rapidement abandonnés, car les difficultés qu'on rencontrait dans leur construction, leurs pressions élevées de fonctionnement et la presque impossibilité de les réparer, ne les rendaient pas aptes aux emplois industriels.

M. L. P. Perkins, arrière-petit-fils de John Perkins, est revenu sur l'idée de son ancêtre, et a créé tout récemment la chaudière représentée schématiquement à la figure 104. Les anciens tubes en hélice sont ici remplacés par des tubes droits plongés dans la flamme et traversant un corps supérieur. Ces tubes sont hermétiquement clos et contiennent une certaine

Digitized by Google

quantité de liquide, qui est supposé se vaporiser dans la partie basse plongée dans les flammes, pour se condenser dans la partie haute en transmettant sa chaleur à l'eau contenue dans le corps et en la vaporisant. Le liquide ainsi condensé ferait retour à la partie basse. M. Perkins ajoute que la partie de ces tubes qui se trouve dans l'espace de vapeur agit comme surchauffeur et que, en proportionnant leur capacité au volume de liquide qu'on y emprisonne, on peut empêcher l'ébullition dans les tubes et assurer ainsi la présence du liquide dans la partie chauffée. En

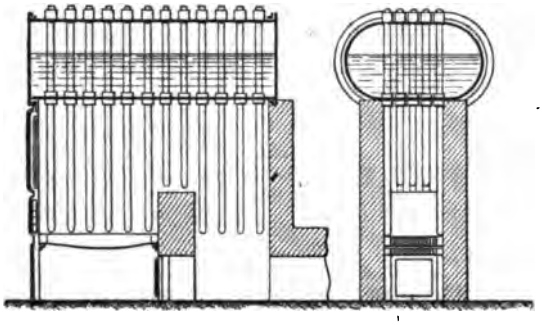


Fig. 104.

effet s'il y avait ébullition dans le tube tout le liquide serait refoulé à la partie haute et y resterait ; le tube se surchaufferait et l'appareil ne fonctionnerait plus. C'est ce qui doit inévitablement se produire, car la surface chauffée des tubes est beaucoup plus considérable que la surface de refroidissement, plongée partie seulement dans l'eau ; à écarts de température égaux les tubes absorberaient plus de chaleur qu'ils ne pourraient en émettre, mais l'écart dans le foyer étant de beaucoup supérieur à celui dans la chaudière, la partie basse des tubes atteindra rapidement une température assez élevée pour permettre même la vaporisation totale du liquide, si son volume est tel qu'il ne puisse entrer en ébullition dans l'espace clos qui l'emprisonne. Si les tubes étaient établis pour résister à ces pressions formidables et aux températures correspondantes, la surface productrice de la chaudière se trouverait presque limitée à la partie du corps supérieur qui est léchée par les flammes. Pour faire disparaître ce vice capital, dont l'importance est telle que toute

Digitized by Google

autre critique de l'appareil devient négligeable, il faudrait que la surface de refroidissement en contact avec l'eau fût au moins cinq fois plus considérable que la surface chauffée des tubes, ce qui ne nous paraît pas facilement réalisable, à moins de revenir à la chaudière primitive de Perkins, qui a dû être abandonnée.

Ce n'est que longtemps après cette dernière que la chaudière multitubulaire actuelle, dite à circulation d'eau, a été réalisée; elle se compose essentiellement d'un faisceau tubulaire, disposé de façon que, étant inégalement chauffé dans ses parties, l'eau plus chaude et moins dense soit canalisée dans le mouvement ascensionnel qui lui est supposé communiqué par l'eau plus froide et plus dense qui descend la remplacer sous l'influence de la gravité.

Chaudière Babcock et Wilcox. — Ce générateur, représenté dans ses parties essentielles à la figure 105, est composé d'un

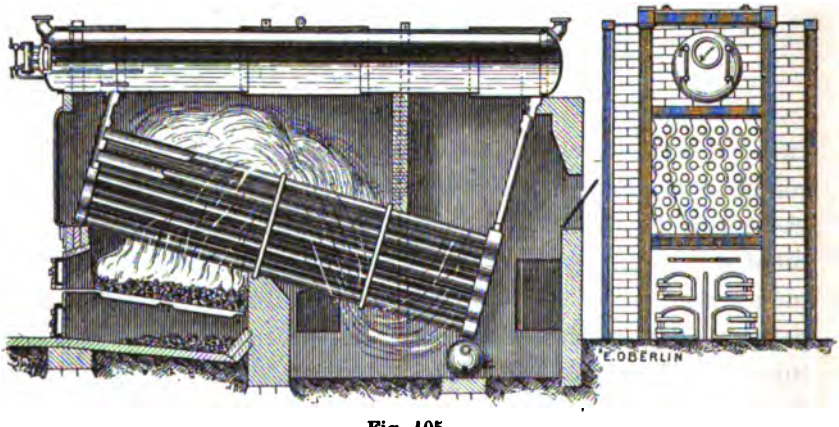


Fig. 105.

faisceau de tubes parallèles, occupant une position inclinée, et reliés entre eux et avec un réservoir horizontal placé à la partie supérieure par des collecteurs verticaux dans lesquels viennent se fixer les extrémités de chaque série verticale de tubes.

Un réservoir ou collecteur de boues est en outre placé à la partie basse des collecteurs arrière avec lesquels il communique. Les collecteurs sont ondulés, ce qui donne une disposition en quinconce aux tubes d'une même série verticale. Toutes les com-

Digitized by Google

munications sont obtenues au moyen de tubes en fer dudgeonnés dans les pièces qui les reçoivent. Une série d'éléments verticaux, placés côte à côte, forme le générateur.

La vapeur produite se dégage à la partie haute du faisceau tubulaire et passe de là dans le corps supérieur; chaque collecteur arrière est relié à ce même réservoir par un tube devant amener l'eau de retour à la partie basse du faisceau.

Chaudière de Naeyer (fig. 106). — La partie chauffée de ce générateur se compose également d'un faisceau tubulaire, incliné

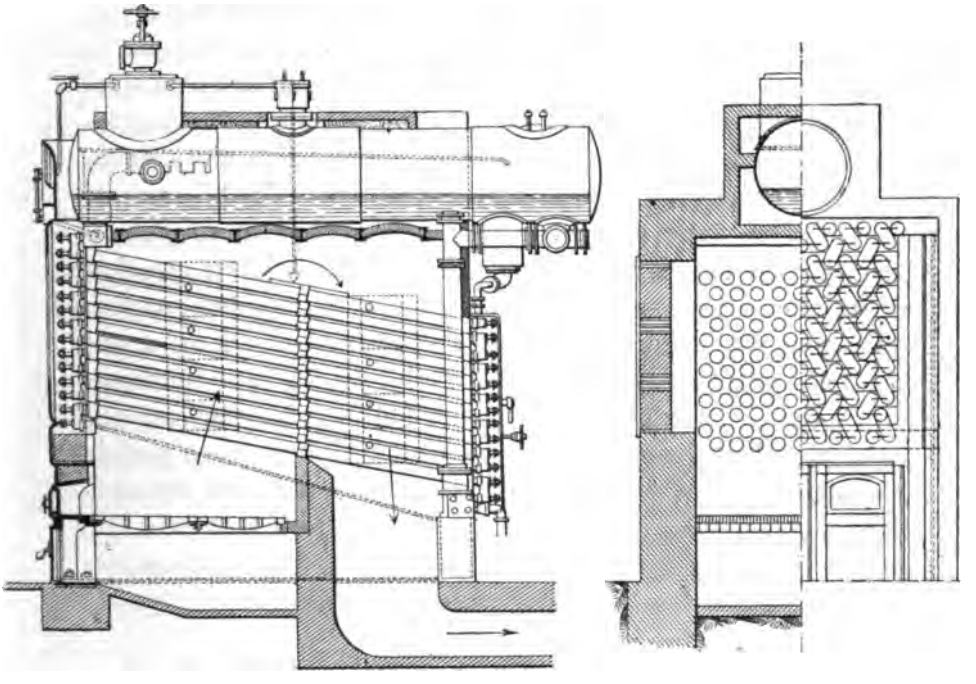


Fig. 106.

d'environ 10°. Les tubes sont assemblés deux par deux en *éléments*, au moyen de boîtes ou manchons en fonte malléable ou en acier, dans lesquels ils sont fixés par les deux bouts, et ces éléments superposés sont mis en communication par des coudes, assemblés avec les manchons par l'intermédiaire de bagues coniques, en fer. Chaque suite verticale d'éléments forme une *série*, et le générateur comprend un certain nombre de ces séries, disposées

Digitized by Google

les unes à côté des autres. Deux collecteurs rectangulaires règnent transversalement au haut et au bas du faisceau tubulaire et communiquent avec les manchons extrêmes de chaque série. Celui du bas, à l'arrière, où débouchent les tuyaux de retour, fournit l'eau à chacune des séries ; celui du haut, à l'avant, reçoit la vapeur formée dans les tubes et débouche dans un réservoir cylindrique qui surmonte le tout, dans lequel s'établit le niveau d'eau normal. De ce réservoir, et à l'extrémité opposée, partent deux tuyaux qui vont rejoindre le collecteur d'alimentation.

Remarques sur les chaudières Babcock et Wilcox, et de Naeyer. — Ces deux types de chaudières, qui ne diffèrent que par le mode d'assemblage et d'alimentation des tubes, sont fort répandus.

La facilité relative de leur construction et les avantages nombreux qu'on leur attribuait à cause de la circulation d'eau qu'on supposait créée par le principe qui en avait guidé l'établissement, en ont fait adopter la disposition essentielle par de nombreux constructeurs en France et en Allemagne. En réservant la question de circulation d'eau sur laquelle nous aurons à nous étendre plus loin, nous voyons que ces appareils ne présentent pas les avantages des générateurs du système Belleville. Ils sont beaucoup plus encombrants : le grand corps cylindrique longitudinal qui se trouve à leur partie supérieure contient un volume d'eau parfois considérable et en cas de déchirure d'un tube les effets dynamiques sont beaucoup plus graves que dans le type Belleville. Le circuit des gaz de la combustion, qui traverse deux ou trois fois le faisceau normalement aux tubes, expose ceux-ci à des températures très inégales à leurs extrémités.

Presque aussitôt après leur mise en service les tubes de coup de feu présentent des traces de surchauffe, et se cintrent inévitablement si l'allure des appareils dépasse une vaporisation moyenne de 10 litres par mètre carré de surface de chauffe. Les constructeurs ont voulu remédier à ce défaut en mettant ces tubes plus épais, ce qui leur donne une plus grande résistance à la pression intérieure qui déchirait les tubes minces surchauffés, mais n'en empêche ni la surchauffe, ni le cintrage.

Le dégagement de la vapeur dans ces appareils est considéra-

Digitized by Google

blement gêné. Dans les chaudières Babcock et Wilcox, 7, 8 et parfois 9 tubes superposés débouchent dans le collecteur sinueux qui les assemble et dont la section transversale est à peine supérieure à celle d'un tube ; enfin ce collecteur est lui-même réuni au réservoir d'eau et de vapeur par une connexion qui n'offre

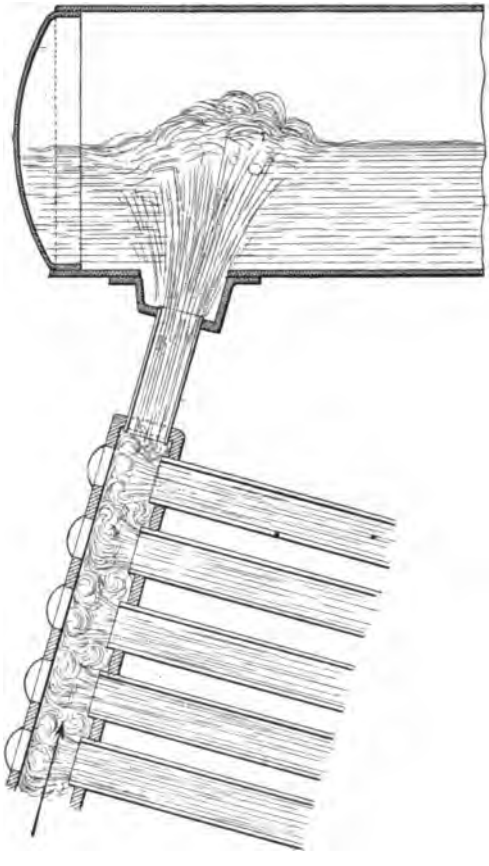


Fig. 107.

qu'une section égale à celle d'un tube, et qui devient parfois insuffisante pour donner passage à la vapeur qui débouche dans le collecteur. En supposant réalisable la circulation très active, dont M. Babcock, comme nous le verrons plus loin, mesure théoriquement la valeur, il est évident que le courant émergeant des tubes dans le collecteur se briserait en droite ligne contre la face opposée (fig. 107) et à cause des

Digitized by Google

remous produits par la réaction formerait un véritable écran pour tout courant ascendant dans le sens de la flèche. Le courant des tubes supérieurs serait à lui seul suffisant pour empêcher tout mouvement dans les tubes inférieurs. Pour que les courants produits par une cause quelconque dans une série de tubes inclinés et débouchant dans un même collecteur puissent se continuer dans ce collecteur, il faudrait que le courant débouchant de chaque tube fût canalisé, de façon à ne pas gêner celui des tubes avoisinants, ainsi que le montre la figure 108, disposition théorique que nos moyens de construction et les besoins de la pratique paraissent rendre irréalisable.

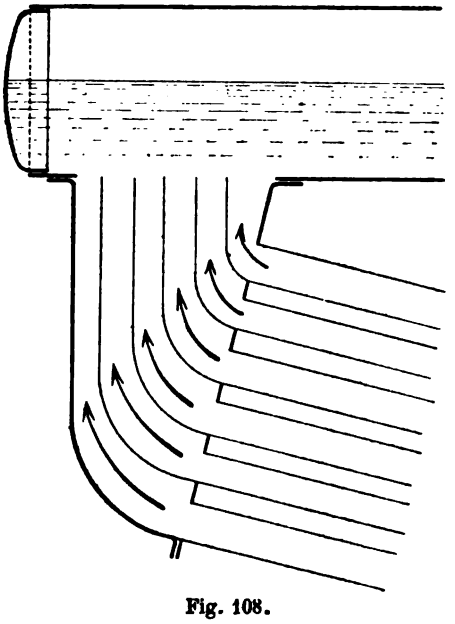


Fig. 108.

Dans le type de Naeyer, le dégagement de la vapeur serait encore plus gêné qu'il ne l'est si la circulation de l'eau se produisait. Nous extrayons du livre *La Vapeur*, édité par la compagnie Babcock et Wilcox, la critique du dégagement de la vapeur dans le mode d'assemblage de la maison de Naeyer.

« Prenons, par exemple, un générateur fort répandu en Europe et vendu en Amérique sous un nom différent. Il est composé de tubes inclinés, assemblés deux à deux à leurs extrémités au moyen de boîtes en fonte. Ces boîtes sont mises en communication l'une avec l'autre à l'aide d'un coude, dont les branches débouchent précisément en face des tubes. Les boîtes et les coudes forment une conduite montante irrégulière dont le chemin brisé doit mener le mélange d'eau et de vapeur vers le réservoir supérieur. Mais (fig. 109) le courant ascendant de mucilage, qui circule dans les coudes, vient à sa sortie heurter contre le courant ascendant du tube fixé sur la même boîte. Un pareil choc constitue

Digitized by Google

une sérieuse entrave à la circulation. Si les deux courants ont la même vitesse, ils se neutralisent complètement ; si l'un est plus fort, il refoule l'autre, et le résultat pratique est le même. »

C'est le cas de dire avec le proverbe, qu'on voit toujours la paille dans l'œil du voisin et non la poutre dans le sien. Mais ainsi que nous aurons l'occasion de le voir plus loin, les chocs de ces torrents de circulation sont loin de se produire, et les résultats industriels de la chaudière de Naeyer sont équivalents à ceux de la chaudière Babcock et Wilcox. Elle a en outre sur cette dernière l'avantage d'être établie en sections amovibles de moindre importance, deux tubes seulement, ce qui en permet le remplacement ou la réparation avec une facilité que le type Babcok et Wilcox, rigidement assemblé dans toutes ses parties, est loin de pouvoir offrir.

Fig. 109.

Quelle que soit la cause qui entrave le dégagement de la vapeur dans ces appareils et leurs congénères, les courants de convection qui se produisent sur les surfaces de chauffe ne sont pas amenés à la surface libre de l'eau dans le réservoir de vapeur, ce qui diminue notablement la puissance de vaporisation de l'appareil, dont l'allure normale, qui ne saurait être dépassée sans danger, est de 10 à 12 litres d'eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure : production égale à celle des chaudières ordinaires à bouilleurs et semi-tubulaires, inférieure à celle des chaudières à foyer intérieur, Cornouaille ou Galloway, lesquelles ont toutes absence complète de circulation de l'eau.

L'alimentation dans la chaudière Babcock et Wilcox se fait généralement dans l'eau du réservoir supérieur ; les dépôts ne s'agglomèrent pas à l'état de boues dans le collecteur spécial placé pour les recueillir à la partie inférieure arrière ; ils pénètrent dans les tubes pour les incruster fortement à la partie arrière, qu'ils finissent parfois par boucher complètement, mais sans que le fonctionnement de l'appareil en soit influencé, pour les causes que nous verrons plus loin. A ce point de vue, le générateur de Naeyer présente un perfectionnement important, car le collecteur de

Digitized by Google

boues y est placé directement sur le corps cylindrique de façon à recueillir une partie des sels, qui sont précipités par l'injection de l'eau dans la vapeur du réservoir supérieur, avant que l'eau ne pénètre dans le tube de descente. De ce chef l'obstruction complète des tubes à l'arrière se produit plus rarement dans les chaudières de Naeyer que dans les Babcock et Wilcox.

Malgré le grand volume d'eau et de vapeur du réservoir supérieur, la stabilité de la pression et du niveau que l'on réclame pour ces appareils n'est pas réelle, et leur conduite exige de la part du chauffeur une attention constante et des soins continus, pour remplacer les appareils automatiques qui font partie du type Belleville et qui facilitent la tâche du chauffeur.

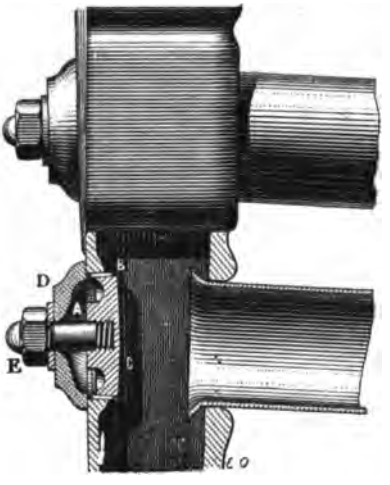


Fig. 110.

L'obturation des ouvertures en regard des tubes par un bouchon maintenu par la traction d'un boulon présente, comme nous l'avons vu, de graves inconvénients ; aussi les nombreux accidents qui ont été causés par ce moyen de fermeture ont forcé les constructeurs à rechercher un mode de fermeture présentant plus de sécurité.

La compagnie Babcock et Wilcox emploie depuis peu une contre-plaque intérieure, laquelle, en cas de rupture du boulon qui est toujours soumis au même effort, est destinée à masquer l'ouverture et à ne laisser au jet de vapeur et d'eau qu'une section très réduite ; ce dispositif est inefficace, car on compte sur la pression intérieure pour maintenir en place cette contre-plaque, et en pratique elle tombe à l'intérieur du collecteur en démasquant toute l'ouverture.

D'autres maisons (Roser, Montupet, etc.), qui construisent en France la chaudière multitubulaire type Babcock et Wilcox, ont adopté un tampon de fermeture tourné cône, venant se loger dans les ouvertures placées en regard des tubes et qui les ferme de

Digitized by Google

l'intérieur à l'extérieur ; on réalise ainsi un joint autoclave, et tout danger de projection des tampons par la rupture du boulon de serrage disparaît complètement. Pour pouvoir introduire les tampons, on ménage sur les collecteurs un certain nombre d'ouvertures elliptiques, qui sont bouchées par un autoclave ordinaire.

Le joint autoclave de MM. Paxman et Plane, représenté à la figure 110, est un perfectionnement important de ce genre de fermeture : le tampon cône C est introduit d'abord par l'ouverture elle-même, et l'étanchéité obtenue par le serrage sur une rondelle métallique et flexible B qui est introduite ensuite en l'aplatissant légèrement. Ce système est d'une pose et dépose plus faciles, et, par le serrage sur la rondelle ductile, assure un meilleur joint que dans le cas du contact direct du tampon et du collecteur.

Chaudière Collet, et modification Niclausse. — Ce générateur, représenté dans ses éléments essentiels figure 111, se compose d'un

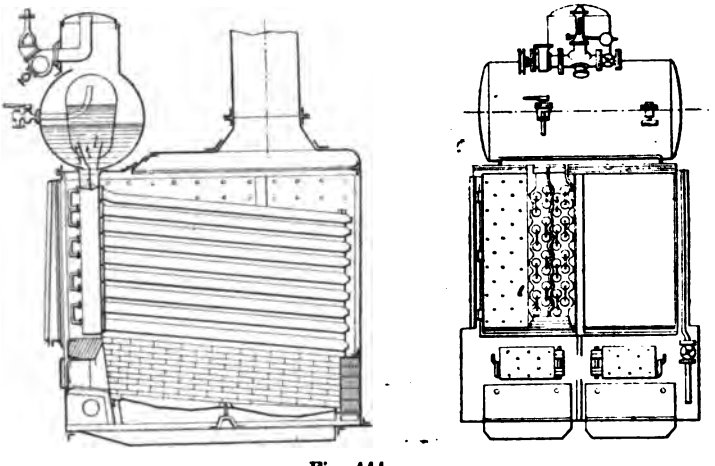


Fig. 111.

faisceau de tubes Field placés parallèlement avec une très faible inclinaison sur l'horizontale, insérés à la partie avant seulement dans un collecteur cloisonné, qui distribue par un de ses compartiments l'eau aux tubes centraux, et recueille par l'autre la vapeur produite dans les tubes extérieurs.

L'insertion des tubes dans le collecteur et la fermeture des

Digitized by Google

ouvertures en regard était obtenue par le premier inventeur au moyen d'un boulon central, traversant les deux tubes concentriques dans toute leur longueur. Ces boulons ne pouvaient suivre les dilatations et les déformations des tubes sous l'action du feu. Il en résultait des efforts énormes qui rendaient les joints très difficiles à faire, et qui ont provoqué dans plusieurs circonstances la rupture du boulon. Dans ce cas le tampon de fermeture et le tube sont en général projetés et la chaudière se vide violemment.

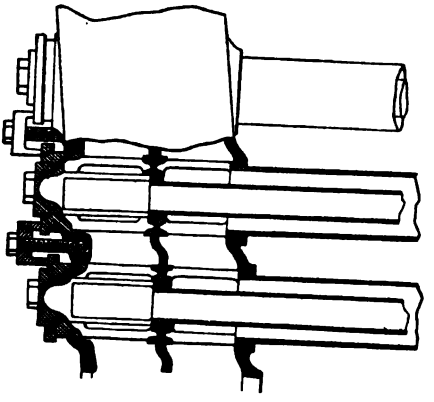


Fig. 112.

Pour remédier aux inconvénients pratiques, et aux dangers qu'occasionnait ce dispositif, le directeur de la société qui exploite le générateur Collet, M. Niclausse, a imaginé le mode d'insertion des tubes dans le collecteur qui est représenté en détail figure 112. Une lanterne fenestrée à trois épaulements tournés cônes est placée dans les trois ouvertures correspondant à un tube sur les deux faces du collecteur et la cloison intermédiaire. Le tube vaporisateur est vissé dans la partie arrière de la lanterne qui reçoit à l'avant l'extrémité filetée d'une deuxième lanterne portant le petit tube intérieur dit de circulation. Les trois joints de la lanterne principale (celui sur le cloisonnement n'a pas besoin d'être rigoureusement étanche) sont obtenus par la pression de cavaliers communs à deux tubes superposés.

Ce dispositif a été imaginé dans le but de rendre le remplacement d'un tube facile et rapide, mais il est d'une construction fort délicate, et l'étanchéité des doubles joints cônes dans la même direction et à faible écartement ne sera plus obtenue après démontage.

Le danger de projection des tubes n'est pas supprimé, car le goujon qui porte le cavalier, doit exercer à chaud une pression suffisante pour faire les joints de deux lanternes et annuler

Digitized by Google

les différences de pression sur les deux cônes extrêmes des lanternes qui tendent à chasser ces dernières : il est soumis à froid aux efforts additionnels considérables que nous avons analysés page 229. La rupture d'un de ces goujons amène fatalement la projection de deux tubes. Une position légèrement anormale d'une des deux lanternes serrées par un même cavalier peut encore amener la rupture de cet étrier ou du goujon, car c'est toujours par le serrage de l'écrou qu'on essaiera d'étancher les fuites au joint.

La sécurité qu'on invoque en faveur de ce dispositif de tubes, dits équilibrés, est plus qu'illusoire et il ne resterait en somme en sa faveur que la facilité de remplacement des tubes avariés ; il eût mieux valu rechercher la suppression de la cause qui avarie si facilement les tubes de coup de feu.

Chaque collecteur reçoit une double série verticale de tubes et communique par une ouverture unique de faible section avec un réservoir cylindrique d'eau et de vapeur et dans lequel s'établit le plan de niveau d'eau.

Les passages ménagés au dégagement de la vapeur sont beaucoup plus réduits dans ce type de générateur que dans ceux des catégories précédentes et présentent à un degré plus élevé les inconvénients que nous avons eu l'occasion de signaler en parlant des types Babcock et Wilcox, et de Naeyer. En outre il n'y a ébullition dans l'espace annulaire que lorsqu'elle peut se produire également dans le tube intérieur ; au coup de feu, la quantité de chaleur absorbée est suffisante pour tenir constamment vides d'eau les deux tubes concentriques, et la vapeur se dégage en partie par le tube central et le collecteur avant[1]. Ces dégagements amènent par intervalles plus ou moins rapprochés des paquets d'eau dans les tubes inférieurs. Dans les rangées supérieures au contraire, la production de vapeur est intermittente et pour ainsi dire spasmodique pour les raisons que nous avons énoncées page 216 : phénomène semblable à celui des tubes Field, dont ceux-là ne diffèrent du reste que par leur position se

[1] Les affreux désastres du *Sarrazin* ne laissent plus subsister aucun doute sur l'absence de l'eau dans les espaces annulaires aux tubes de coup de feu. Nous verrons du reste plus loin que même les tubes à pleine section libre se dégarnissent d'eau.

Digitized by Google

rapprochant de l'horizontale. Comme dans ces derniers, les dépôts s'accumulent à l'extrémité des tubes qu'ils obstruent parfois d'une façon complète, et la disposition du générateur, qui ne permet pas la vidange complète du faisceau tubulaire, est à cet égard fort défectueuse. Pour vider l'eau, il faut dévisser tous les bouchons de fermeture à l'arrière des tubes ; l'eau coule sur l'ouvrier et inonde le parquet et les carneaux. Il faut recourir au démontage complet du faisceau tubulaire pour le nettoyage intérieur : c'est sans doute ce qui a amené M. Niclausse à rechercher le moyen d'obtenir l'amovibilité des tubes, aux dépens de toute autre qualité dans l'appareil de M. Collet.

En pratique cette amovibilité n'est pas aussi facile qu'on pourrait le supposer ; l'adhérence des surfaces de contact des joints cônes, qui doivent être mathématiquement dressés, est telle, que les oreilles placées extérieurement pour décoller la lanterne, et sur lesquelles on agit au moyen d'un levier à fourche, cassent le plus souvent.

L'inutilité des tubes intérieurs dits de circulation a été démontrée d'une façon frappante à l'installation de générateurs faits par la société Collet au concert de l'Eldorado à Paris. Le démontage de ces tubes étant indispensable pour l'enlèvement des dépôts, on oublia lors d'un nettoyage intérieur périodique de les remonter ; ce n'est qu'à l'époque de la visite suivante qu'on s'aperçut de leur absence lorsqu'on voulut les enlever. Dans l'intervalle la chaudière avait fonctionné dans les conditions ordinaires.

Chaudière Dürr. — Un générateur fort répandu en Allemagne, la *chaudière Dürr*, est établie sur ce même principe : les collecteurs cloisonnés de la chaudière Collet y sont remplacés par un caisson unique à diaphragme qui occupe tout le front de la chaudière : un ou plusieurs réservoirs d'eau et de vapeur, placés longitudinalement, viennent s'insérer sur la face arrière de ce caisson. Cette disposition a sur celle de M. Collet, le seul avantage d'offrir au dégagement de vapeur la section entière de la partie du caisson qui est aménagée dans ce but ; elle en a tous les autres inconvénients et ne réalise pas l'amovibilité des éléments qui la composent.

Digitized by Google

Chaudière Barbe. — Elle se compose d'un corps cylindrique formant réservoir d'eau et de vapeur, et d'un faisceau tubulaire très compact composé de tubes d'un plus petit diamètre que ceux ordinairement employés dans les générateurs à éléments sectionnables.

Ce faisceau tubulaire est inséré dans deux plaques, formant fonds de deux caissons d'inégales dimensions, celui d'arrière,

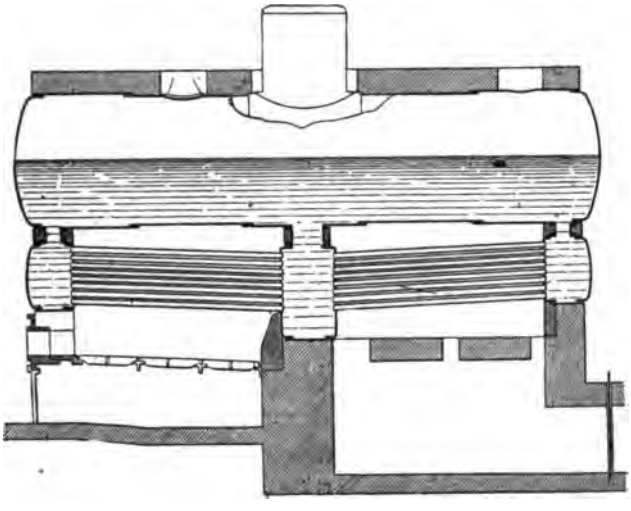


Fig. 113.

destiné à remplir le rôle de collecteur de boues, étant le plus important.

Les dimensions du coffre avant où se dégage la vapeur sont plus faibles, pour permettre sa fermeture par une plaque amovible, et dont l'ouverture démasque en totalité la plaque tubulaire avant.

La figure 113 donne l'ensemble d'un générateur Barbe pour les types de grande puissance, 75 m. q. de surface de chauffe et au delà, et qui se compose de deux appareils du type de moins de 75 m. q. placés symétriquement bout à bout, avec caisson collecteur de boues commun, et dont un des faisceaux tubulaires est parcouru en deuxième retour de flammes.

Ce générateur n'offre aucune particularité de construction, à l'exception d'une gorge intérieure pratiquée au milieu des alésages

Digitized by Google

des plaques tubulaires, dans le but de s'opposer à l'arrachement des tubes.

Son fonctionnement est en tous points analogue à celui des autres appareils à tubes d'eau similaires.

Chaudière Lagrafel et d'Allest. — La figure 114 représente ce type de générateur multitubulaire et dont la particularité réside surtout dans les dispositions données au foyer. Ainsi qu'on le verra à

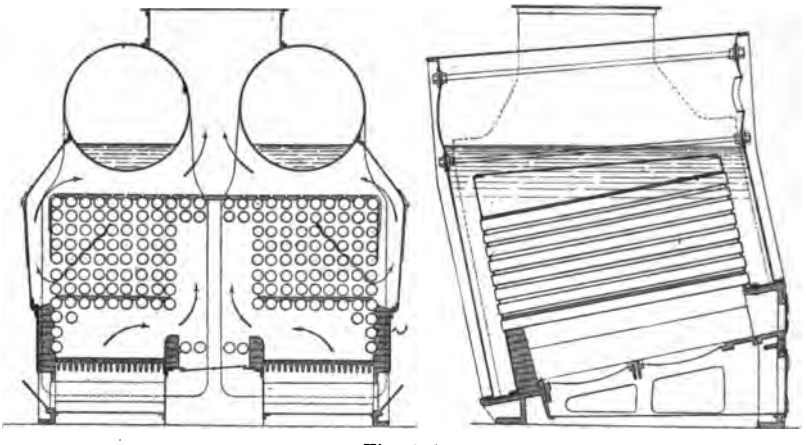


Fig. 114.

l'examen de la coupe transversale, une unité se compose de deux corps de chaudière et de deux faisceaux tubulaires indépendants, avec deux grilles mais une seule chambre de combustion commune. C'est l'application aux chaudières à tubes d'eau des dispositifs de foyers que nous avons vus réalisés dans les chaudières Galloway et dans les chaudières marines à foyers multiples et faisceaux tubulaires de retour de flamme.

La combustion s'opère toutefois dans les appareils Lagrafel et d'Allest, dans des conditions beaucoup plus avantageuses que pour le cas des foyers intérieurs.

Il est inutile d'examiner l'agencement et le fonctionnement du faisceau tubulaire, qui rentre dans les cas généraux des chaudières à tubes d'eau.

On trouvera dans le *Bulletin de la Société scientifique de Marseille*, deuxième trimestre 1888, une note relative à une série

Digitized by Google

d'essais effectués sur ce type de chaudières, par M. Taton, ingénieur de la marine, et qui a été rédigée et présentée par les inventeurs.

Les tableaux qui accompagnent cette note contiennent suffisamment de données pour en permettre l'analyse sommaire : le lecteur qui serait impressionné par les résultats officiels obtenus, verra ci-après comment il faut interpréter d'une façon générale tous les tableaux d'essais. Ces remarques ne visent pas spécialement les chaudières Lagrafel et d'Allest, mais tous les tableaux d'essais annonçant de hauts rendements, et où ceux-ci sont d'ordinaire imprimés en caractères d'autant plus gros que le rendement est plus élevé.

Prenons l'essai n° 1. Nous y trouvons :

Eau vaporisée par kilogramme de charbon pur . .	$11^{kg},65$
Température de l'eau d'alimentation	25°
Pression de la vapeur	$3^{kg},5$
Température de l'air.	21°,5

Les 11,65 kilogrammes de vapeur, à 3,5 kilogrammes de pression, produits avec de l'eau à 25° contiennent :

$$(651,44 - 25)\ 11,65 = 7\,298 \text{ calories.}$$

L'analyse des gaz à la boîte à fumée donne pour le poids des gaz produits par 1 kilogramme de charbon pur : 21,27 kilogrammes. La chaleur emportée par ces gaz est de

$$21,27 \times 0,25\ (198,5 - 21,5) = 936 \text{ calories.}$$

D'après M. Scheurer-Kestner, dont l'autorité en matière de combustible et chauffage est invoquée au cours des considérations qui accompagnent la relation de ces essais, la perte par rayonnement dans un appareil s'approchant de la perfection, avec foyer en briques, ne saurait être inférieure à 20 p. 100 des calories dégagées par le combustible : en supposant à celui employé pour les essais une puissance calorifique théorique de 8 000 calories par kilogramme de combustible pur, la perte par rayonnement a été de 1 600 calories.

$$\text{Ensemble } 7\,298 + 936 + 1\,600 = 9\,834 \text{ calories.}$$

et ce en négligeant toutes les autres causes de perte.

Digitized by Google

Nous ajouterons encore que les méthodes employées pour les analyses des gaz et la mesure des températures n'étaient pas exactes. Cette dernière ne donnait que des indications approchées en moins, et dont l'approximation dépendait entièrement de l'opérateur. On aurait obtenu des chiffres plus approchés, et dans tous les cas beaucoup plus élevés, en mesurant la température des gaz à leur sortie du faisceau tubulaire avec un thermomètre à mercure : nous estimons qu'une erreur involontaire de 50° a dû se produire dans l'évaluation des basses températures, ce qui nous donne encore 265 calories à ajouter aux 9 834 ci-dessus.

D'un autre côté l'appareil Orsat, excellent pour les sucreries où il ne s'agit de doser que l'acide carbonique, et qui peut au besoin donner des indications sommaires lorsqu'il s'agit des gaz d'une chaudière, n'est pas disposé pour doser avec certitude l'oxyde de carbone, ainsi que nous l'expliquerons en traitant de la combustion. Il accuse d'une façon générale une combustion beaucoup plus parfaite que celle qu'on obtient en réalité dans les foyers des chaudières. Il y a donc de ce chef une nouvelle perte, et que M. Scheurer Kestner déjà cité évalue à 5 p. 100 du pouvoir calorifique théorique du combustible employé pour le cas d'une combustion pouvant être considérée comme parfaite : perte additionnelle de 400 calories pour le cas que nous examinons.

Il eût donc fallu, en se plaçant dans les meilleures conditions, que le kilogramme de combustible brûlé eût un pouvoir calorifique théorique de 10 500 calories par kilogramme de combustible pur, pour obtenir la vaporisation réelle des 11,65 kilogrammes d'eau inscrite au tableau.

Cette anomalie s'explique par les entraînements d'eau. On peut, sans être taxé d'exagération, conclure que dans cette expérience le poids d'eau entraîné mécaniquement avec la vapeur a été de 30 p. 100 environ de l'eau d'alimentation ; en tenant compte de la chaleur contenue dans ce poids d'eau la vaporisation réelle tombe à un chiffre plus modeste, mais plus réalisable s'approchant de 8 kilos, ce qui doit être considéré comme un excellent résultat.

Chaudières multitubulaires diverses. — Tous les autres types

Digitized by Google

de chaudières multitubulaires, dits à circulation, peuvent être ramenés aux dispositifs principaux que nous venons d'examiner. Un très grand nombre n'en sont que la reproduction presque complète ; nous terminerons ce chapitre en reproduisant à titre simplement documentaire quelques autres dispositions d'ensemble, ainsi que quelques générateurs mixtes, dans lesquels le faisceau des tubes d'eau ne constitue plus la totalité de la surface de chauffe.

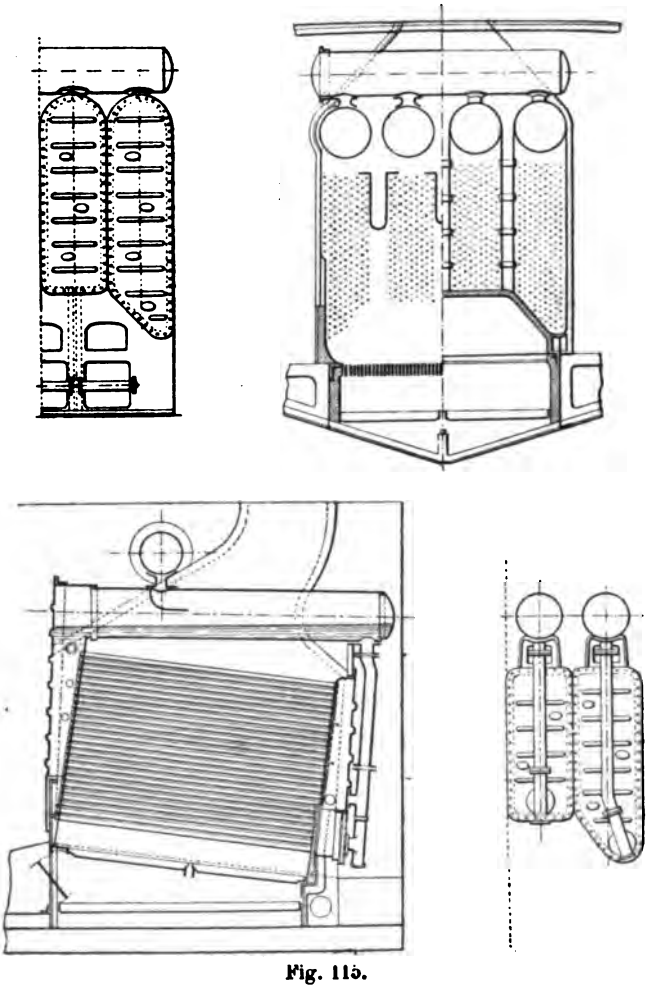


Fig. 115.

Chaudière Seaton (fig. 115). — Type étudié spécialement pour la marine. Les tubes de petits diamètres et en très grand

Digitized by Google

nombre sont insérés dans des caissons, dont une des faces est amovible ; celle-ci est formée par une tôle ondulée, et l'enlèvement de ce couvercle découvre en entier les plaques tubulaires. Le générateur se compose en réalité de quatre parties indépendantes, formant chacune une chaudière avec son réservoir d'eau et de vapeur et son tuyau de retour d'eau, et réunies par un collecteur de vapeur transversal.

Chaudière Charles et Babillot (fig. 116). — Le faisceau tubulaire se compose de deux séries de tubes, l'une concentrique à

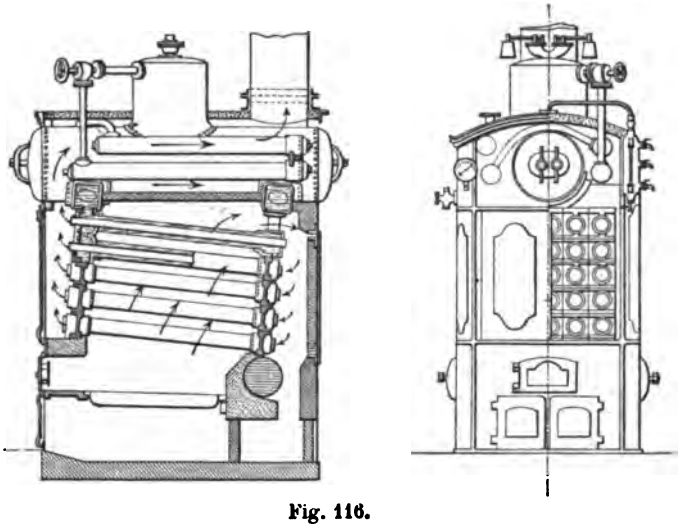


Fig. 116.

l'autre ; les gaz après avoir chauffé à l'extérieur les tubes d'eau, parcourent les tubes de fumée intérieurs. Disposition vicieuse qui a donné lieu à de gros mécomptes [1].

Chaudière Hornsby (fig. 117). — C'est un générateur multitubulaire du type classique : on y a ajouté un corps cylindrique dans lequel se trouve le foyer. Le dégagement de la vapeur produite dans le corps cylindrique se fait d'abord dans le caisson du faisceau tubulaire qui le surplombe, et de là, avec la production des tubes, dans le réservoir supérieur au moyen

[1] Voir à la fin du chapitre XVII.

Digitized by Google

d'un caisson intérieur qui la fait déboucher au-dessus du plan de niveau d'eau.

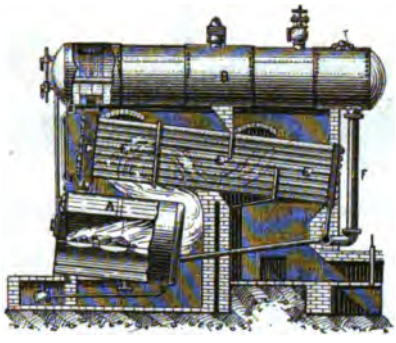


Fig. 117.

Chaudière Anderson et Lyall (fig. 118). — Ce type est composé d'un faisceau de tubes d'eau au coup de feu, d'une chambre

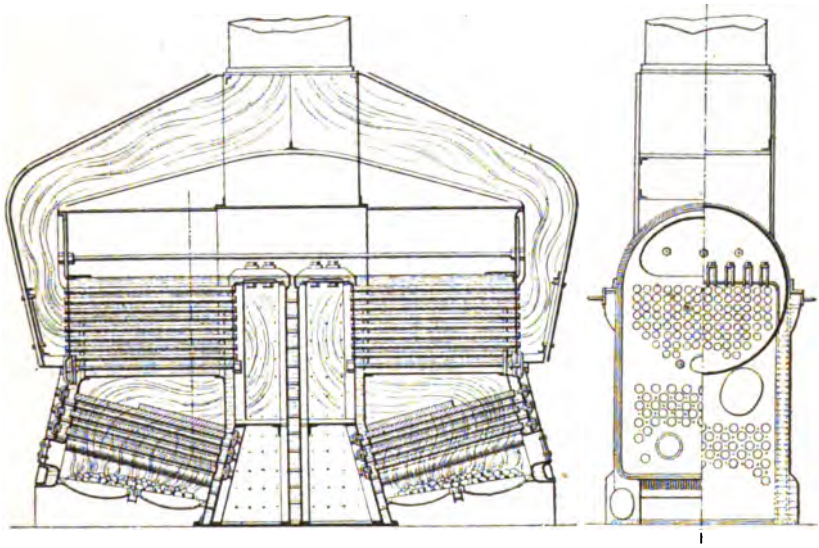


Fig. 118.

de combustion et d'un faisceau de tubes de fumée en deuxième retour; la figure représente une chaudière marine à double foyer symétrique.

Chaudière Hervier (fig. 119). — Chaudière à bouilleur au

Digitized by Google

coup de feu, à tubes d'eau ensuite, pour redevenir à bouilleur,

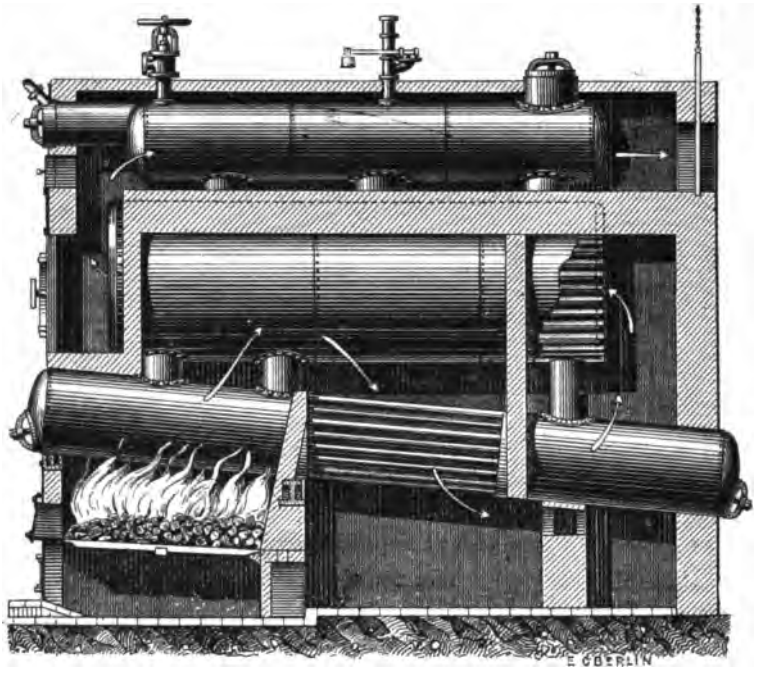


Fig. 119.

de là tubulaire à tubes de fumée, pour redevenir chaudière à

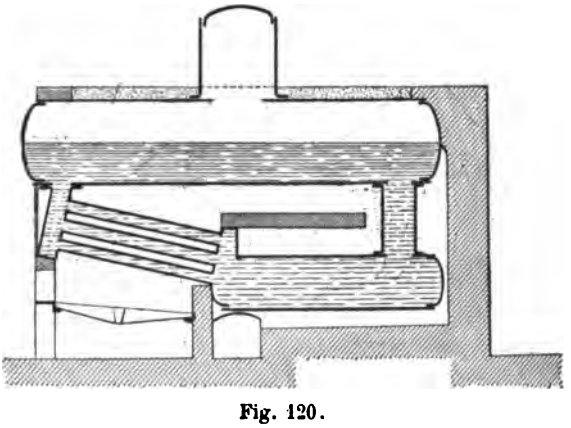


Fig. 120.

bouilleur. Il ne faut pas désespérer de voir l'inventeur parvenir un jour à y adapter un foyer intérieur.

Digitized by Google

Les figures suivantes montrent le faisceau des tubes d'eau placé exclusivement au coup de feu (fig. 120), comme réchauf-

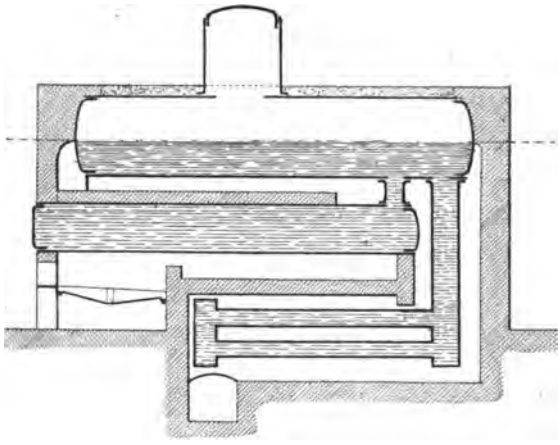


Fig. 121.

feur horizontal en quatrième retour (fig. 121), comme réchauffeur vertical en parcours direct (fig. 122).

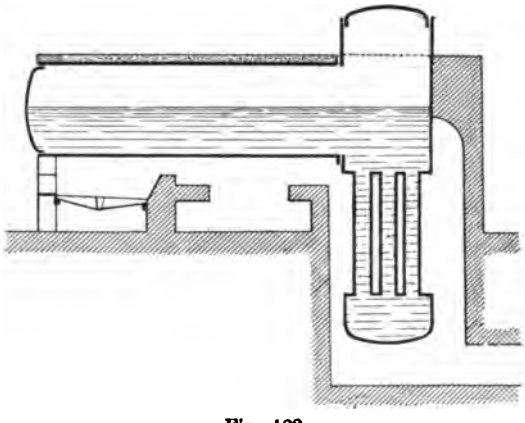


Fig. 122.

Chaudière Pell (fig. 123). — Disposition d'ensemble inspirée par les générateurs à tubes d'eau de torpilleur que nous examinerons au chapitre xv. Trois faisceaux tubulaires, à grande pente, partent d'un réservoir cylindrique horizontal placé derrière l'autel et aboutissent à trois réservoirs supérieurs, dont celui de façade et l'intermédiaire sont réunis par deux séries de

Digitized by Google

tubes de communication, l'une pour la vapeur, l'autre pour l'eau. Le réservoir supérieur intermédiaire n'est réuni au réservoir arrière, qui seul reçoit l'eau d'alimentation, que par une série de tubes de vapeur.

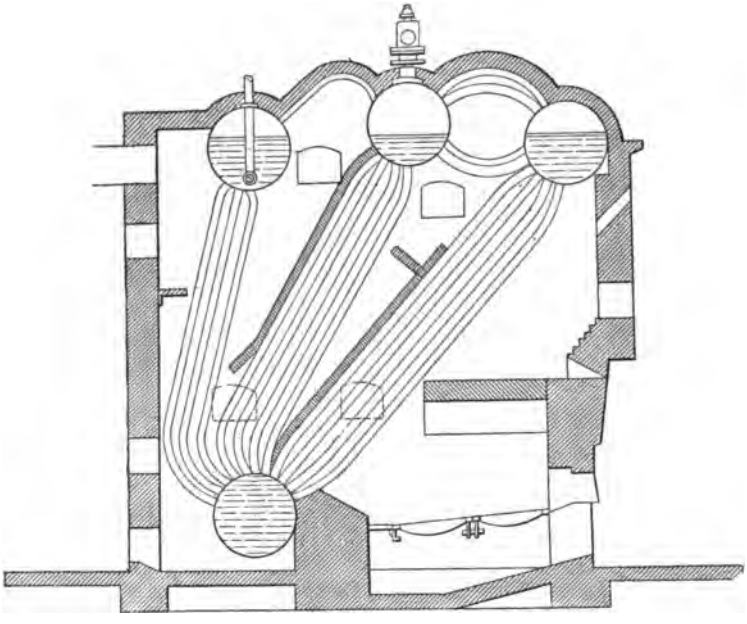


Fig. 123.

La figure indique clairement le parcours des gaz. Nous aurons l'occasion d'étudier au chapitre xv le fonctionnement des tubes d'eau dans les chaudières de torpilleur dont ce type n'est qu'une adaptation pour les installations industrielles.

Digitized by Google

CHAPITRE XIV

FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES DITES A CIRCULATION

Théorie de Babcock sur la circulation dans les chaudières multitubulaires. — Nous aborderons maintenant le point le plus important de la critique des générateurs multitubulaires dits à circulation : la circulation défectueuse et insuffisante de l'eau.

Nous emprunterons à nouveau ici quelques passages à la conférence faite en février 1890 à Cornell University, par M. George H. Babcock, lequel, avec Field et de nombreux autres ingénieurs, a été un des apôtres de la théorie erronée qui suit :

« Après avoir brièvement examiné les avantages de la circulation de l'eau dans les chaudières, recherchons les meilleurs moyens de la produire et les conditions les plus avantageuses. Nous avons vu dans notre vase ouvert[1] qu'il était essentiel que les courants ne puissent s'opposer les uns aux autres. Or, si nous pouvions observer de nos yeux complètement le phénomène de la vaporisation dans une chaudière multitubulaire ordinaire, nous verrions un curieux combat de courants, poussant tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, changeant continuellement de sens, et luttant de force pour gagner une supériorité momentanée. Les principaux courants ascendants se manifesteraient aux deux extrémités, l'un au-dessus du foyer, l'autre à l'extrémité des tubes sur une longueur d'environ 300 millimètres. Entre les deux se tiendrait la lutte des courants descendants avec les courants ascensionnels de vapeur et d'eau. Si la pression vient à s'abais-

[1] Voir page 139.

Digitized by Google

ser légèrement, par suite d'une brusque prise de vapeur, ou d'une levée subite des soupapes de sûreté, l'eau, entraînée par le dégagement instantané de la vapeur dans toute la masse, se soulève en jets violents de tous les points de la surface du liquide. Les effets d'une production soudaine de vapeur sont connus. Qui ne se rappelle l'expérience du vase de Florence, dans lequel on fait bouillir de l'eau, en diminuant la température d'ébullition à l'intérieur du vase par l'application d'un réfrigérant à l'extérieur ? Qui n'a été témoin de la projection violente du geyser minuscule produit lorsqu'on essaie de porter à l'ébullition l'eau contenue

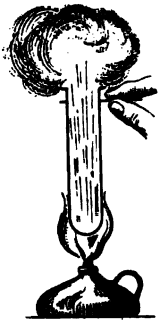


Fig. 124.

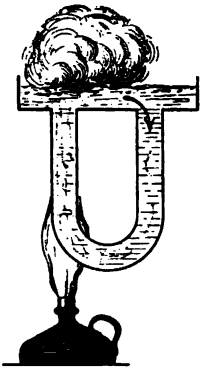


Fig. 125.

dans une éprouvette placée verticalement au-dessus d'une lampe ? (fig. 124).

« Prenons maintenant un tube en U (fig. 125) placé à la partie inférieure d'un vase rempli d'eau. Plaçons une lampe allumée contre une des branches. Une circulation régulière ne tardera pas à s'établir, et aucune action spasmodique ne viendra l'interrompre. Cette circulation dans le tube en U nous représente le vrai principe de la circulation d'eau qui s'établit dans une chaudière à tubes d'eau bien construite. Pour obtenir une surface de chauffe plus considérable, on peut donner au jambage chauffé la forme d'un long tube incliné (fig. 126). Nous venons ainsi de réaliser le générateur à tubes inclinés bien connu aujourd'hui.

« Si à ce premier tube nous en ajoutons d'autres (fig. 127), nous augmenterons encore la surface de chauffe, tout en conservant la forme et le fonctionnement du tube en U. Dans une sem-

Digitized by Google

blable disposition, la circulation est fonction de la différence de densité des deux colonnes. Sa vitesse est donnée en mètres par la formule de Torricelli $v = \sqrt{2gh}$, ou approximativement $v = 4{,}43\sqrt{h}$, où $h = H\left(\frac{D}{d} - 1\right)$. Dans cette formule, H est la hauteur de la colonne mesurée du niveau du plan d'eau au centre du tube au-dessus du foyer ; D et d les poids du mètre cube du fluide dans les colonnes descendante et ascendante. La vitesse croîtra jusqu'à ce que la colonne montante ne contienne plus que de la vapeur, mais la quantité ou le poids du fluide en circulation

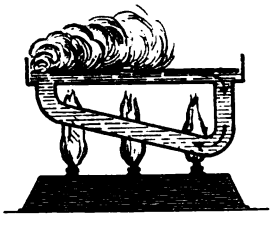


Fig. 126.

Fig. 127.

égale à Sdv ou proportionnelle à $\sqrt{d}\,(D - d)$, atteindra le maximum, lorsque la densité du mélange de vapeur et d'eau dans la colonne montante sera la moitié de la densité de l'eau de la colonne descendante, ou lorsque $\frac{D}{d} = 2$; alors $v = \sqrt{2gH}$. Il en est approximativement ainsi lorsqu'il y a moitié vapeur et moitié eau dans la colonne montante, le poids de la vapeur étant négligeable en présence du poids de l'eau.

« Il est aisé d'après cette règle de calculer la circulation dans toute chaudière construite sur ce principe, pourvu que la construction laisse un libre mouvement à l'eau. Il est évident que chaque coude est une cause de ralentissement, mais dans une chaudière bien comprise et bien proportionnée ces ralentissements sont de peu d'importance. »

Ici M. Babcock démontre naturellement, par applications de ses formules, que la chaudière Babcock et Wilcox est parfaite au point de vue de la circulation de l'eau et il continue :

« En rédigeant le projet d'une chaudière de ce type, il faut

Digitized by Google

bien se garder d'adopter comme colonne montante commune à une série de tubes superposés un collecteur trop large ; car, s'il était suffisamment large, il s'y produirait un courant descendant et l'effet de la colonne montante pour opérer la circulation serait complètement annulé (fig. 128). Ce fait est rendu évident par le simple examen de ce qui se passerait dans un collecteur très large alors que la charge qui produit la circulation est uniquement celle qui résulte de l'inclinaison d'un tube pris séparément. Il perd sa raison d'être lorsque le collecteur est suffisamment petit pour être entièrement rempli par le mucilage ascendant d'eau et de vapeur. Il faut encore que le collecteur soit aussi régulier que possible, et ne présente pas ces rétrécissements et ces élargissements nombreux qu'on y rencontre parfois. »

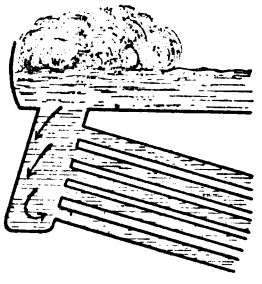


Fig. 128.

M. Babcock continue par l'éreintement des chaudières analogues à la sienne, qu'il s'efforce à démontrer dépourvues de toute circulation d'eau, gêné dans ses argumentations par la formule qu'il a créée et dont l'application à ces chaudières concurrentes, même en y ajoutant toute sorte de pertes de charge, aurait pour résultat de leur donner une circulation d'eau aussi active que dans la sienne.

Critique de la théorie de Babcock. — Cette théorie de la circulation de l'eau dans les chaudières est basée sur deux lourdes erreurs, contraires aux lois élémentaires de l'hydrostatique. Elle a été battue en brèche ouvertement, pour la première fois, par le journal *The Engineer*, lequel dans une série de remarquables articles publiés dans ses livraisons de janvier et février 1894 a combattu les erreurs grossières qui avaient été la base de cette théorie. Lorsque, en 1892, M. Paul Dubiau nous fit part de ses observations sur les phénomènes qui accompagnaient le dégagement de la vapeur dans les chaudières à bouilleurs, nous fûmes saisis par une analogie possible avec ce qui devait se passer dans les chaudières multitubulaires, dans lesquelles nous avions des raisons pour mettre en doute l'existence de la circulation d'eau.

Digitized by Google

Ainsi que cela arrive souvent, nous poursuivions en France l'étude de cette question, pendant qu'elle faisait l'objet de recherches analogues en Angleterre : la date du brevet demandé par M. Dubiau pour son appareil destiné à créer une circulation d'eau dans les chaudières, 14 janvier 1893, et la communication des résultats de nos expériences à des amis, en France et en Angleterre, pendant le deuxième semestre de 1893, nous assure l'originalité de nos travaux ; en outre nous différons par plus d'un point avec les déductions et quelques-unes des expériences relatées par le

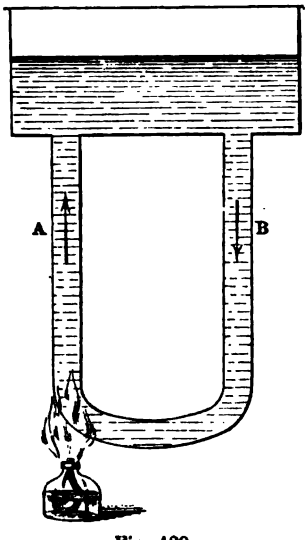


Fig. 129.

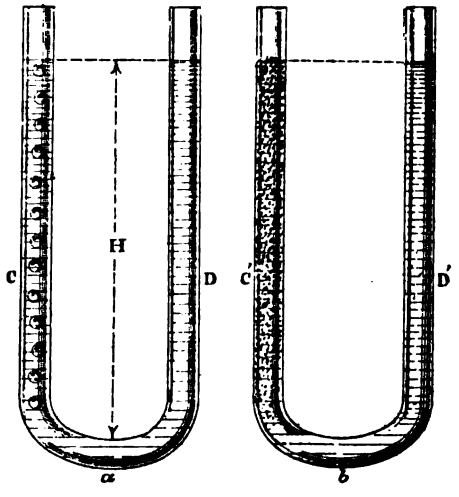


Fig. 130.

journal *The Engineer;* mais nous sommes toutefois heureux de pouvoir citer l'autorité de cette publication scientifique à l'appui de nos observations.

Si nous reprenons le tube en U de M. Babcock (fig. 129), nous voyons que la théorie admise de la circulation repose sur la différence de poids des masses fluides contenues dans les branches A et B, et que la vitesse maxima est obtenue lorsque le contenu de la branche A pèse la moitié du contenu de la branche B, ce qui équivaut à dire que la branche A contient des volumes égaux d'eau et de vapeur. Ce principe est faux, et est en contradiction avec les lois fondamentales de l'hydrostatique. Si nous supposons une des branches C d'un tube en U (fig. 130) remplie de bulles

Digitized by Google

de vapeur séparées des parois par le liquide qui les environne, les lois de la physique élémentaire nous feront reconnaître de suite que les molécules liquides qui se trouvent au bas du tube sont soumises du côté de chaque branche à la même pression, celle d'une même colonne d'eau de hauteur H, malgré que le poids du contenu de la branche C soit de beaucoup inférieur à celui de la branche D. Si une vérification expérimentale était nécessaire, il suffirait de remplir de petits morceaux de liège, comme en *b* de la figure 130, une des branches du tube en U ; l'on verra qu'en y versant de l'eau, celle-ci s'élève au même niveau dans les deux branches. On a ainsi oublié la théorie des vases communiquants et que la pression exercée par l'eau est fonction de la hauteur de la colonne et non du poids du volume contenu dans le vase. Il suffirait alors, en revenant à la figure 129, de placer dans la branche A une série de petites balles de liège enfilées et de maintenir ce chapelet fixé dans cette branche, pour que le poids du contenu de la branche A fût *toujours* inférieur à celui de la branche B, et créer ainsi un mouvement perpétuel de l'eau.

Cette objection qui détruit dans sa base la théorie de la circulation de l'eau dans les chaudières, telle que M. Babcock l'a résumée, n'avait pas échappé à sa sagacité, et pour y parer, au cas où elle aurait été soulevée, ce qui ne s'est pas produit de son vivant, il appelle à plusieurs reprises l'eau contenant des bulles de vapeur, le *mucilage* d'eau et de vapeur, ce qui éveille l'idée d'un mélange intime de ces deux corps, formant un état de densité intermédiaire : la densité des colonnes variant, il y aurait mouvement de la colonne plus dense vers la colonne moins dense.

Nous avons vu pages 46 et suivantes que cette émulsion d'eau et de vapeur ne pouvait pas se produire dans les chaudières, et que ce n'est qu'à la surface libre seulement qu'il y a production d'écume par accumulation des bulles de vapeur. On peut du reste varier à l'infini les expériences en amenant à l'ébullition de l'eau pure ou additionnée de corps savonneux ou gras dans un appareil en verre disposé comme à la figure 129 : jamais on n'y provoquera la formation d'*une colonne de mousse dans la branche chauffée.*

On peut facilement réaliser une expérience démontrant l'ab-

Digitized by Google

surdité de la théorie des différences de masses totales, même à chaud, en disposant un tube en U, figure 131, à tubulure, dans laquelle passe un petit tube en verre à pointe effilée en communication avec un ballon chauffé et contenant de l'eau. La pointe effilée est dirigée dans le sens de l'axe vertical de la branche du tube en U, dans lequel on verse de l'eau bouillante dès que celle du ballon entre en ébullition. Si le diamètre du tube en U est

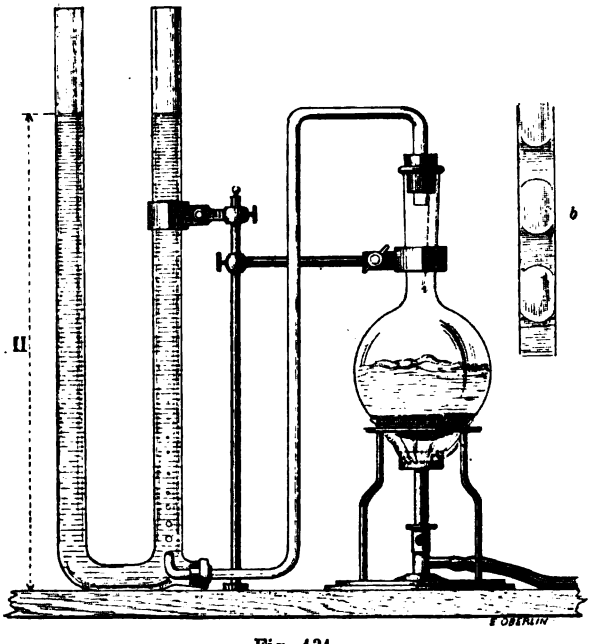


Fig. 131.

suffisant (30 millimètres) on peut produire, en réglant la chauffe du ballon, une succession de bulles de vapeur, qui s'élèvent dans la branche du tube, et qui tout en déplaçant un volume d'eau considérable, ne provoquent aucune montée du niveau dans la branche où elles se dégagent, sauf l'agitation de la couche superficielle due à la poussée que le liquide exerce sur les bulles de vapeur.

Mais si l'on pousse la chauffe du ballon de façon à augmenter le dégagement de vapeur, les bulles s'agglomèrent, et acquièrent un diamètre suffisant pour venir toucher les parois du tube, lequel est alors occupé comme en *b* par un chapelet de bulles de

Digitized by Google

vapeur et de pistons d'eau : le niveau s'élève dans la branche du tube où la vapeur se dégage dans ces conditions.

Dans les conditions du tube en U de la figure 132, il est facile de se rendre compte du phénomène qui provoque le mouvement de l'eau, car, abstraction faite du poids de la vapeur, la colonne d'eau H de la branche B n'étant pas équilibrée par la somme des colonnes *h* dans la branche A, le mouvement se produit.

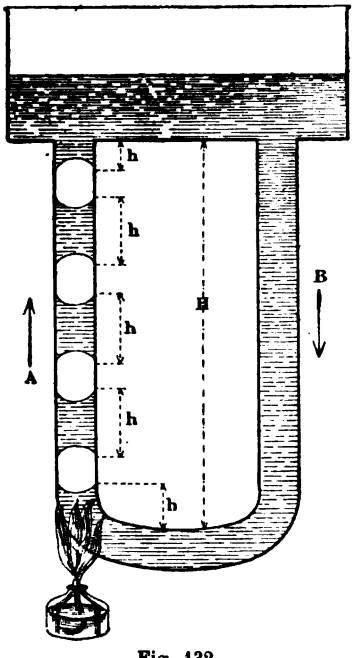


Fig. 132.

Ceci est un phénomène particulier aux tubes d'expériences de petit diamètre, que nous avons eu l'occasion d'examiner au chapitre IX, mais qui nous démontre ici que, en harmonie avec les lois de l'hydrostatique, il ne suffit pas qu'un corps plus léger soit disséminé dans la masse d'une colonne liquide, pour y provoquer un mouvement sous la poussée d'une autre colonne de même hauteur : il faut que les deux colonnes d'eau soient de hauteur différentes.

On peut réaliser une expérience très intéressante en plaçant bout à bout deux ballons à long col (fig. 133) de 45 à 50 millimètres de diamètre, mis en outre en communication par un tube de retour : en y faisant bouillir de l'eau, on verra distinctement que la plus grande partie de l'eau descendra par les cols dans le ballon du bas : dans son mouvement descendant elle refoule les bulles de vapeur.

En effet, comme nous l'avons vu au chapitre I, la gravité est le seul agent de l'élévation des bulles de vapeur dans la masse d'eau, et ce n'est pas la vapeur qui monte, c'est l'eau qui l'environne qui descend pour prendre sa place. Cette eau prendra toujours le plus court chemin. Dans cette dernière expérience on constate aussi une descente d'eau par le tube de retour : cela est dû à ce que les bulles de vapeur en s'agglomérant occupent toute

Digitized by Google

la section du col : il y a alors différence de charge et mouvement. La vapeur ne se dégage en effet, à l'extrémité des cols, que par saccades, en gros ballons, avec de violentes secousses et de très fortes projections de la nappe d'eau : mais à chaque dégagement de vapeur on voit nettement le refoulement de toute la colonne fluide dans les cols.

Voici ce que dit à propos de la vitesse de dégagement d'une bulle de vapeur le journal *The Engineer* dans son numéro du 19 janvier 1894 :

« La vitesse ascensionnelle d'une bulle de vapeur serait énorme, s'il n'y avait la résistance du liquide qu'elle doit traverser. (Ici, en admettant possible la formation dans une masse d'eau d'une bulle de vapeur de 28 litres 3, *The Engineer* calcule que son accélération au bout d'une seconde serait de 609^{m},59, qu'elle aurait traversé pendant ce temps un espace de 304^{m},79, et continue :) « Naturellement une telle vitesse ne saurait en aucun cas se réaliser à cause de l'action retardatrice de grosse importance, qui modifie la vitesse de la bulle montante. Supposons, figure 134, un récipient A très haut contenant de l'eau, à la partie basse duquel nous maintenons par une cordelette un cube vide B de 28 litres 3 de capacité. Dans cet état, le centre de gravité de la masse d'eau sera quelque part, au-dessus de la ligne médiane C, supposons en *d*. Si nous coupons la cordelette, le cube B montera à la surface et supposons-le s'arrêter dans la position indiquée en pointillé F. Mais B ne eut

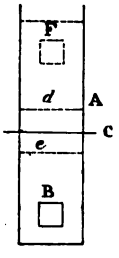


Fig. 134.

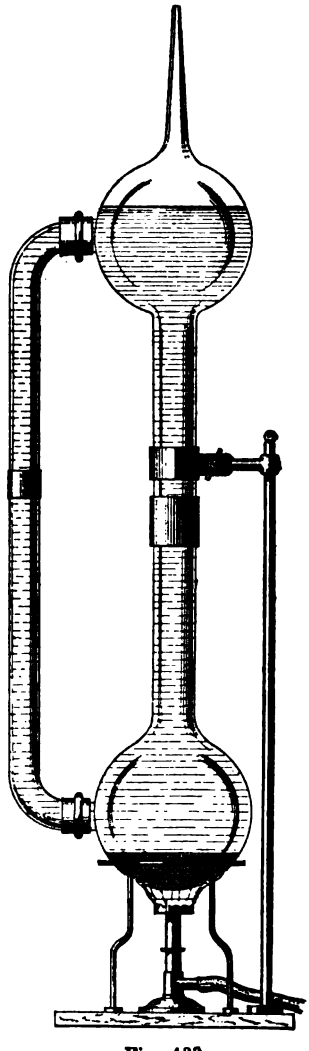


Fig. 133.

Digitized by Google

monter qu'en faisant baisser le centre de gravité de la masse d'eau, en *e* par exemple, et la vitesse ascensionnelle avec laquelle B monte est enfin limitée par cette chute du centre de gravité. En y réfléchissant on verra que la section transversale de la masse d'eau ou, plutôt, le rapport entre la masse d'eau totale et celle du volume déplacé par B, a une influence importante. Ainsi tandis que B doit monter en F, le centre de gravité du contenu de A, doit seulement descendre de *d* en *e*. La seule déduction à tirer de cela en connexité avec les chaudières multitubulaires, c'est que plus grande sera la section du tuyau de retour d'eau, plus grande, toutes autres choses étant égales, sera la vitesse ascensionnelle d'une bulle de vapeur.

« Pour employer une locution populaire, les bulles de vapeur *flottent* à la surface de l'eau : mais elles acquièrent dès l'origine une grande vitesse ascensionnelle. Pour simplifier les choses nous avons négligé le poids de la vapeur, mais surtout dans le cas des hautes pressions, les bulles de vapeur ont un poids appréciable. Ainsi la vapeur à 12 kilos de pression pèse plus de 9 kilos 5 le mètre cube : chaque bulle a donc un moment. L'on peut dire qu'elle part à grande vitesse, et que dès le début jusqu'à la fin de sa course elle est retardée par l'eau qu'elle doit traverser. Elle pousse cette eau devant elle, et il en résulte un courant ascensionnel, auquel, en ce qui concerne l'eau seulement, les seules résistances qui s'opposent sont le frottement dans les tubes et les contractions aux étranglements. En conséquence, si nous permettons à la vapeur de se dégager librement à l'endroit même où elle se produit, il n'y a pas de limite à la puissance de vaporisation de la chaudière : il y aura toujours de l'eau prête à remplacer la vapeur engendrée.

« Il est impossible de rendre intelligible à ceux qui ne sont pas à même de faire une distinction mentale entre la masse et le poids, les rôles de l'eau et de la vapeur sous les conditions qui se présentent dans une chaudière multitubulaire. Nous croyons toutefois en avoir dit assez pour avoir démontré clairement que la vitesse avec laquelle une bulle d'air ou de vapeur s'élèverait dans l'eau, serait énormément supérieure à celle d'une masse égale de matière tombant dans l'air, s'il n'y avait pas la résistance de l'eau.

Digitized by Google

Il est ici intéressant de citer M. Krauss de Vienne, lequel en écrivant dans un journal américain, *Power*, au sujet de la circulation de l'eau dans les chaudières multitubulaires, dit : *Si la hauteur de la colonne d'eau qui surmonte une bulle de vapeur est de* $1^m,370$ *la vitesse de la bulle au moment où elle frappe la surface serait de 75 mètres par seconde, les frottements et les autres résistances dues au déplacement de l'eau environnante étant négligées.* Dans ce calcul interviennent le poids de la bulle et celui du volume d'eau déplacé. M. Krauss continue : *Mais l'eau environnant la bulle doit être déplacée. Si tel n'est pas le cas et qu'on place un tube au-dessus de la bulle, l'on verra que celle-ci doit non seulement élever la colonne d'eau qui la surplombe, mais aussi celle qui se trouve au-dessous d'elle. L'énergie potentielle nécessaire peut être supposée fournie par une autre colonne d'eau voisine. Si le tube se fermait à la partie inférieure il ne pourrait se produire aucun mouvement*[1], *l'énergie potentielle ne pouvant se transformer en énergie cinématique. Si le bas du tube était seulement partiellement fermé, le mouvement de la colonne sera beaucoup plus faible que si toute la section était ouverte.* »

Nous avons traduit en entier ce passage des intéressants articles du journal *The Engineer*, parce qu'ils sont par points inexacts, et de nature à entretenir encore dans les esprits des idées fausses sur quelques-unes des questions qui se rattachent au dégagement de la vapeur et à la circulation de l'eau, dont ce même journal, dans les mêmes articles, a battu en brèche les autres avec une compétence remarquable.

Dans les déductions tirées de l'exemple de la figure 134, l'auteur de cet article dit que la vitesse ascensionnelle des bulles de vapeur augmente avec la section de la masse liquide, ou mieux avec le rapport entre cette masse et celle du volume déplacé par la bulle. Si cette section ou cette masse s'approchaient de l'infini la vitesse deviendrait infiniment grande. Or il n'est personne qui n'ait été à même de remarquer la majestueuse lenteur[2] avec laquelle montent à la surface des étangs, des lacs ou de la mer,

[1] Cela est vrai si la bulle occupe toute la section transversale du tube. (Note du journal *The Engineer*.)

[2] Le mot *lenteur* est ici pris dans un sens relatif.

Digitized by Google

les bulles d'air ou de gaz dégagées au fond. Nous avons vu, pages 7 et suivantes, comment se dégageait une bulle d'air ou de vapeur dans une masse d'eau, la forme qu'elle prenait, le chemin qu'elle parcourait. Cette forme et ce chemin montrent que la bulle est loin de soulever la colonne d'eau qui la surplombe, auquel cas elle suivrait en s'élevant son axe vertical, mais que au contraire elle doit pénétrer, s'insinuer entre les couches d'eau superposées, et se frayer un chemin dont le parcours et la longueur sont en harmonie avec le travail nécessité pour vaincre les résistances qui s'opposent à sa montée. L'eau qui descend pour faire place à la bulle d'air ou de vapeur plus légère, glisse sur la surface de cette bulle et loin d'intéresser toute la masse liquide, ce mouvement n'intéresse que le volume d'eau environnant égal au volume déplacé. Le passage emprunté par *The Engineer* à M. Krauss confirme ce que nous avançons : si nous enserrons théoriquement la bulle dans un tube dont les parois ne seraient pas mouillées par l'eau, de telle sorte qu'elle ne soit pas en contact par les côtés avec la masse d'eau, elle ne pourra monter que si une colonne d'eau voisine a une hauteur suffisante pour mettre en mouvement la colonne d'eau qui surplombe la bulle et celle qui se trouve au-dessous.

La création d'un courant d'eau ascensionnel par la poussée d'une bulle de vapeur est une illusion dont il faut revenir. Si l'on fait déboucher au fond d'un large récipient en verre contenant de l'eau froide une série de petits tubes débitant de l'air, et que l'on place des index en papier dans l'eau, on verra que le dégagement des bulles d'air ne provoque dans la masse du liquide aucun courant ascensionnel : ce n'est que lorsque les corps en suspension sont allégés par une bulle gazeuse, que le hasard leur accole, qu'ils montent à la surface, pour retomber dans leur milieu d'équilibre dès que la bulle les a abandonnés.

A ce sujet *The Engineer* se met lui-même en contradiction flagrante. Après avoir dit dans son premier article, numéro du 12 janvier 1894, page 22, colonne 2, que dans le cas de la figure 135, que nous lui empruntons avec les suivantes, personne ne supposerait qu'une circulation puisse se produire, il expose avec raison, dans son numéro du 19 janvier, que dans le cas de

Digitized by Google

la figure 136 une circulation se produit effectivement, pour dire immédiatement après que dans le cas de la figure 137, air substitué à la vapeur, il y a mouvement. Il suffit de jeter un coup d'œil sur les figures pour voir immédiatement la contradiction, que M. Krauss, cité par *The Engineer* à propos de ces questions, s'est empressé du reste de relever dans une lettre adressée par lui à cette publication scientifique, insérée dans son numéro du 23 mars.

Le journal se défend de cette contradiction apparente en faisant remarquer que dans le cas des figures 135 et 136 les

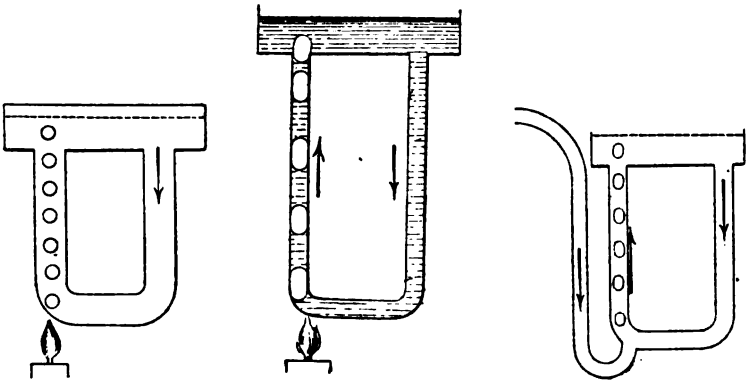


Fig. 135. Fig. 136. Fig. 137.

exemples ont été choisis pour démontrer que la circulation par différence de poids ne peut se produire que s'il se réalise simultanément différence de hauteur de colonne d'eau ; tandis que l'exemple de la figure 137 est choisi pour démontrer que le mouvement se produit par la poussée des bulles sur les colonnes d'eau qui les surplombent, sans qu'il y ait besoin de faire intervenir une source de chaleur : il retombe dans l'erreur qu'il a soutenue.

Dans la discussion qui a suivi la publication du journal *The Engineer* sur la circulation de l'eau dans les chaudières multitubulaires, M. Irwin, Ingénieur en chef du Canadian Pacific Railway au Canada, a opposé le fonctionnement de l'élévateur d'eau de Pohlé aux théories du journal.

Celui-ci se compose (fig. 138) d'un compresseur d'air A, d'un réservoir intermédiaire A′, d'un tuyau d'air comprimé B plongeant dans une nappe d'eau à une profondeur variable, et débouchant en dessous d'un tuyau de refoulement C.

Digitized by Google

L'air refoulé par le compresseur se dégage en bulles occupant la section entière du tuyau d'élévation d'eau, qui est alors parcouru par des pistons alternés d'eau et d'air, et la hauteur en colonne d'eau de ces chapelets étant inférieure à celle qui existe entre l'orifice du tuyau de déversement et le niveau de l'eau à élever, un flux continu d'eau et d'air se déversera à l'orifice supérieur du tuyau de montée. Ce flux s'arrêtera dès que le niveau de l'eau aura baissé d'une quantité suffisante pour que les deux colonnes se fassent équilibre ; à ce moment l'action pourra se reproduire, si l'on augmente la pression de l'air, ce qui équivaut à un allègement de la colonne de refoulement, les pistons d'air y occupant une plus grande hauteur. On conçoit ainsi qu'on pourra élever l'eau à n'importe quelle hauteur, à la condition de proportionner la charge d'eau en dessous du niveau d'aspiration et la hauteur de la colonne totale d'eau dans le tube de déversement.

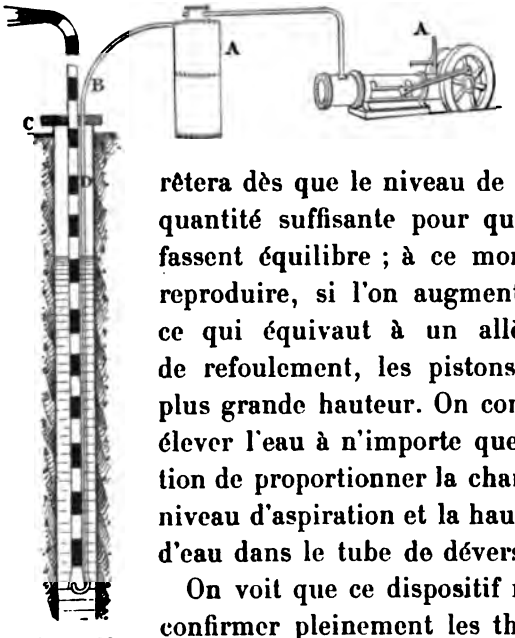


Fig. 138.

On voit que ce dispositif ne fait au contraire que confirmer pleinement les théories de *The Engineer* et les nôtres, et que l'action de la force ascensionnelle de l'air à laquelle le correspondant attribue le fonctionnement de la pompe Pohlé est erroné, car s'il en était ainsi, il serait inutile de faire plonger le tuyau d'élévation à une certaine profondeur : il suffirait de lui faire affleurer d'une façon continue le niveau de l'eau pour que celle-ci fût élevée : cela est loin de se réaliser dans ces conditions, car la charge qui provoque seule le mouvement disparaît. Il est facile de le constater par une expérience de laboratoire, et l'on observera ainsi directement que lorsque la charge d'eau est insuffisante pour mettre en mouvement toute la colonne d'eau et d'air, les bulles d'air traversent les pistons d'eau sans les pousser.

En reprenant l'expérience de la figure 131 avec de l'eau froide dans le tube en U, nous verrons que lorsque la vapeur commence

Digitized by Google

à se dégager par la pointe du petit tube effilé, elle se condense en libérant des myriades de petites bulles d'air qu'elle contenait : elle sort de l'orifice avec une vitesse considérable, car le frottement produit est suffisant pour que le bouchon du flacon soit

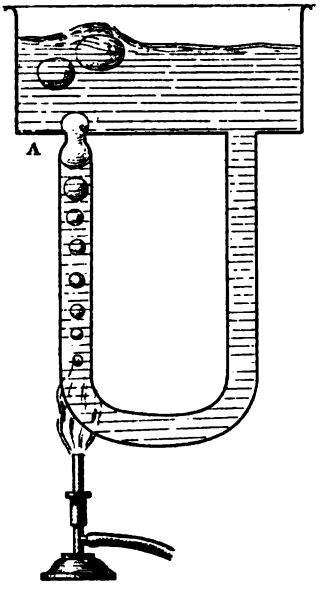


Fig. 139.

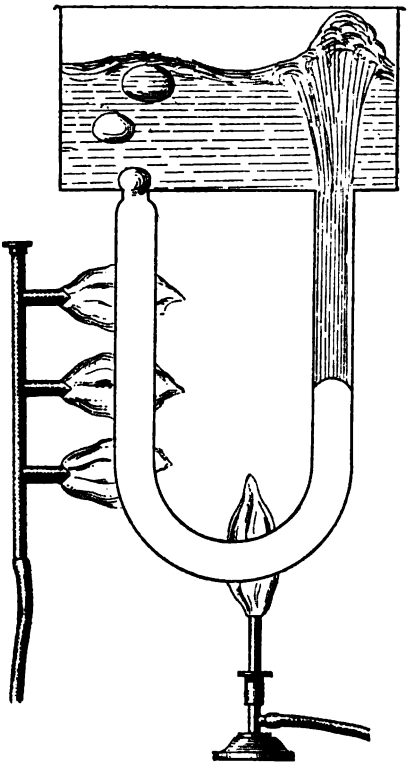


Fig. 140.

violemment projeté : elle produit dans la masse d'eau immédiatement au-dessus du tube un courant ascendant très violent, mais qui s'émousse à quelques centimètres, contre les couches d'eau supérieures, pour se transformer en courant descendant jusqu'à un ou deux centimètres au-dessous de l'ouverture du tube, et de là reprendre ensuite sa course ascendante. Les petites bulles d'air qui sont entraînées dans ce tourbillon en miniature en font suivre la vitesse, les mouvements et l'étendue : au-dessus, les bulles qui se détachent de la zone extérieure du tourbillon, montent à la surface avec une vitesse beaucoup moindre

Digitized by Google

que celle qu'elles avaient dans le tourbillon, dont la poussée ne fait pas varier la hauteur du niveau dans les deux branches.

Si, au contraire, nous étudions le fonctionnement d'un appareil de laboratoire disposé comme la figure 129, nous verrons qu'un courant ascensionnel s'y produira, même si les bulles de vapeur qui se dégagent ne forment pas chapelet dans la branche, parce que celle-ci est chauffée sur une étendue très limitée, et que les courants de convection de l'eau peuvent monter librement à la surface et s'y étaler.

Mais si, comme dans la figure 139, nous produisons en A un étranglement, pour diminuer le rapport entre la surface chauffée et le passage du courant ascensionnel dans le récipient supérieur, la contraction de la veine provoque un plan de niveau d'eau en dessous de l'étranglement, le courant de convection se localise dans la branche du tube, la surface offerte à l'évaporation devient négligeable par rapport à la surface libre, tout mouvement de circulation disparaît et la production de vapeur diminue. Si nous augmentons dans ces conditions l'intensité de la source de chaleur, la branche chauffée du tube en U se remplit de vapeur et celle-ci se dégage en partie par la branche destinée à servir de retour d'eau (fig. 140) en provoquant à chaque dégagement des brusques rentrées d'eau qui remplissent complètement les deux branches, et arrêtent la vaporisation.

Expériences sur la circulation et la vaporisation dans les tubes. — L'étude des phénomènes qui accompagnent la vaporisation dans un tube en U rattaché verticalement à un réservoir dans lequel se trouve le plan de niveau, nous a paru devoir être poussée à fond, et dans ce but nous avons réalisé une longue série d'expériences, en faisant varier le diamètre des tubes (de 10 à 30 millimètres), l'étendue de la surface chauffée, la hauteur de ces tubes. Il serait trop long et fastidieux d'énumérer ici en détail cette longue série d'essais qui peut être facilement réalisée par les personnes intéressées, mais en voici les résultats : il s'agit ici bien entendu de tubes en U ayant partout la même section, sans aucun étranglement, la section de retour égale à celle de dégagement, les deux branches verticales, et dans les-

Digitized by Google

quelles la production par mètre carré de surface de chauffe est loin d'atteindre les plus basses vaporisations que l'on obtient aux surfaces de coup de feu des générateurs industriels.

Pour la plus faible intensité de chauffe, la circulation est d'autant plus active que le diamètre du tube est plus petit ; dès que les diamètres croissent, on constate dans la même branche du tube un courant montant et un courant descendant : celui-ci tend à disparaître en augmentant la surface chauffée et l'intensité des foyers. On remarque aussi que le maximum de circulation est obtenu lorsque la branche peut être occupée dans toute sa section par les courants de convection et par les bulles de vapeur, ce qui donne une canalisation parfaite. Si la section offerte est trop grande pour l'intensité de chauffe, il y a courant descendant dans la même branche, mouvement désordonné des deux courants contraires, et dégagement saccadé de la vapeur en grosses bulles du diamètre du tube. Si la section est au contraire trop petite le tube tend à se remplir de vapeur et la production est intermittente : toute la colonne d'eau et de vapeur est projetée violemment hors de la branche chauffée, qui se remplit d'eau avec arrêt de la vaporisation, jusqu'à nouvelle production de vapeur, qui est suivie d'un nouvel arrêt et ainsi de suite.

Cette production intermittente et éruptive de vapeur peut être facilement reproduite, quelle que soit l'intensité du chauffage et le diamètre du tube, en proportionnant à la surface de chauffe et à son activité, la hauteur du plan de niveau dans le réservoir au-dessus du débouché du tube. Si la hauteur de cette colonne est faible par rapport à celle de la branche chauffée, ce phénomène s'établit immanquablement : c'est le cas des chaudières à petits tubes du type torpilleur lorsque les tubes débouchent en dessous du plan d'eau.

La violence avec laquelle la colonne de la branche chauffée est ainsi expulsée, fait que l'eau appelée dans le retour produit à la surface un tourbillon nettement accusé qui se prolonge jusque dans la branche, où l'air est aspiré.

Ceci est le fonctionnement des tubes de petits diamètres placés verticalement : tout autre est celui des tubes inclinés sur l'horizontale.

Digitized by Google

Pour étudier celui-ci nous avons fait établir (fig. 141) en tubes de verre de 25 millimètres, un petit appareil identique à celui présenté par M. Babcock (fig. 127). Nous avons ainsi constaté que les directions des courants, tels qu'il les a représentés par les flèches de la figure, n'existent pas en réalité. Quoique la section qui débouche dans le collecteur soit exactement celle qui correspond à la canalisation des courants de convection qui se pro-

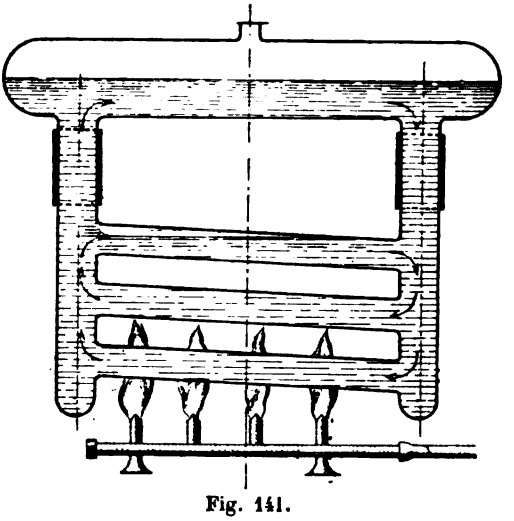


Fig. 141.

duisent dans le tube du bas, la circulation dans celui-ci est alimentée partie par le retour, et partie par le tube supérieur qui est parcouru par un courant descendant, qui entraîne avec lui de la vapeur (fig. 141). Le tube supérieur se remplit ainsi parfois complètement de vapeur et celle-ci se dégage à l'arrière par le retour.

Nous avons alors été conduit à étudier ce qui se passe dans des tubes d'un plus gros diamètre, et avons établi l'appareil de démonstration représenté à la figure 142. Les tubes en verre ont 60 millimètres de diamètre et 400 millimètres de long. Le diamètre des sections du dégagement et du retour est également de 60 millimètres : l'appareil a un double système de retour bouché alternativement, pour étudier les cas du retour par le haut ou le bas des collecteurs arrière. Le fonctionnement de cet appareil est le suivant :

Le retour par le tube supérieur est nettement accusé.

Digitized by Google

Le dégagement de la vapeur par le collecteur avant dans le réservoir se fait par saccades, en gros ballons et l'on voit nettement l'eau descendre par le même chemin.

La vitesse de translation de la veine liquide dans le tube du bas est très faible : on voit les bulles de vapeur monter presque verticalement à la génératrice supérieure et s'y accumuler.

On voit enfin un plan de niveau d'eau s'établir très nettement dans le tube du bas et celui du haut : la vapeur ne se dégage par

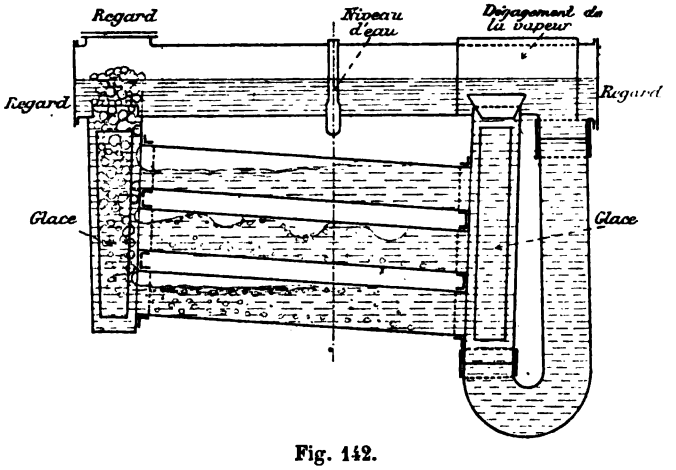


Fig. 142.

l'extrémité avant des tubes que lorsque la flèche déterminée par l'abaissement du plan d'eau a atteint environ le tiers du diamètre, et la vapeur dégagée par les tubes du bas et intermédiaires est en partie refoulée dans le tube supérieur, qui se vide d'eau d'autant plus que la vaporisation est plus active dans le tube du bas. Quant au tube du milieu, il est parcouru par de grosses poches de vapeur.

En bouchant à la fois les deux retours, on provoque un mouvement d'eau extrêmement actif entre les deux tubes supérieurs et celui du bas : celui du haut se trouve alors occupé plus que par moitié par de la vapeur.

Il est d'après cela facile de se rendre compte de ce qui se passe dans les chaudières multitubulaires, où 8, 9 et parfois 12 tubes, de 100 à 125 millimètres de diamètre, et 4, 5 ou 6 mètres de long sont ainsi réunis par deux collecteurs et que les tubes du bas, exposés au rayonnement de la grille, produisent comme minimum

Digitized by Google

150 kilos de vapeur par mètre carré de surface de chauffe directe et par heure.

S'il y a dans ceux-ci un mouvement de l'eau, les tubes du haut se vident, et s'il y a vaporisation très active ce sont les tubes de coup de feu qui se trouvent alors complètement dégarnis d'eau.

Ces appareils d'expérience nous ont encore montré une autre particularité : c'est que tous les corps en suspension dans l'eau viennent se déposer à la partie basse du collecteur avant : c'est donc là la place du collecteur de boues et non à l'arrière, ainsi que nous l'y avons vu. La pratique a du reste depuis longtemps démontré qu'il n'y avait jamais de dépôts dans les collecteurs de boues placés à l'arrière, au bas des collecteurs, et ce qui précède l'explique.

Expériences sur les chaudières multitubulaires. — Tel est le fonctionnement des tubes dans les chaudières multitubulaires, dont les dispositions ont pour effet, loin de provoquer une circulation dans le véritable sens que nous attachons à ce mot, c'est-à-dire un mouvement initial de *toute la veine* fluide qui parcourt les tubes, d'empêcher au contraire même la montée dans le réservoir des courants de convection qui aideraient puissamment la vaporisation si les dégagements étaient proportionnés aux surfaces de chauffe.

Cette absence de mouvement explique pourquoi dans la pratique les tubes de retour s'obstruent par les dépôts jusqu'à offrir à l'eau un passage 20 fois moindre que celui calculé pour assurer la circulation, sans que le fonctionnement de la chaudière soit en aucune façon modifié : pourquoi on peut impunément supprimer les tubes de descente, comme le fait M. Yarrow en Angleterre depuis trois ans sur ses chaudières multitubulaires, sans que les résultats obtenus avec ses appareils soient aucunement modifiés : pourquoi la chaudière Belleville, où l'eau n'arrive sur les surfaces de chauffe qu'en quantité très limitée, mais y arrive sûrement, donne en pratique, sans circulation d'eau, des résultats de beaucoup supérieurs à ceux des appareils à circulation illusoire.

En octobre 1893 nous avons eu l'occasion de constater en présence de M. Bonet, ingénieur principal de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du nord de la France, les phénomènes suivants :

Digitized by Google

Une des chaudières multitubulaires d'un groupe de trois appareils de 100 mètres carrés de surface de chauffe, du type à circulation avec réservoir longitudinal à grand volume à la partie supérieure, avait été vidangée la veille et remplie le matin avec de l'eau froide jaugée. Le faisceau tubulaire, le réservoir de boues et le tuyau de retour d'eau, contenaient 2 000 litres d'eau : le

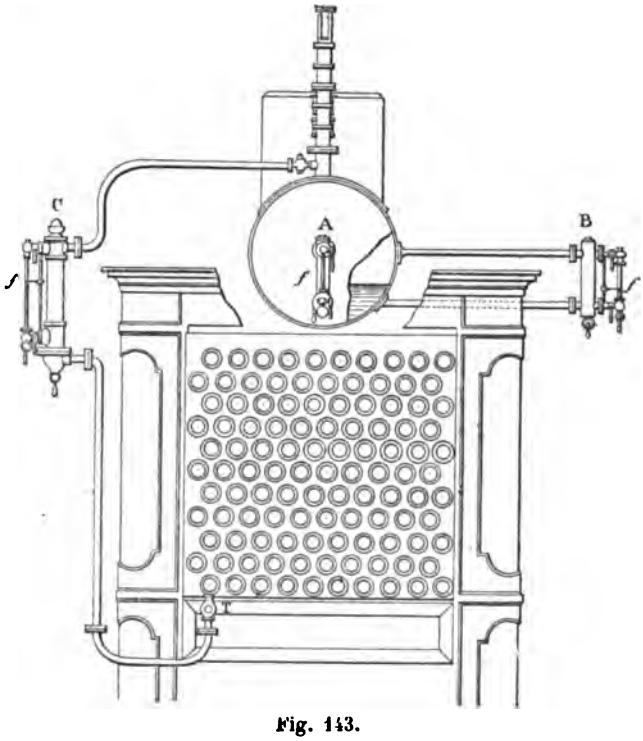


Fig. 143.

volume de l'eau contenu dans le réservoir d'eau et de vapeur était également de 2 000 litres ; les feux allumés et le plan d'eau repéré sur le tube de verre, dès que l'ébullition se produisit dans le générateur, le niveau de l'eau s'éleva progressivement dans le tube jusqu'à disparaître par la bague supérieure de l'indicateur. La chaudière fut mise en batterie dès que la pression le permit, et fonctionna pendant une heure environ, sans avoir été alimentée, pour ramener le niveau au repère. A ce moment on voulut alimenter, mais un des joints de la conduite spéciale d'alimentation sauta. La chaudière fut aussitôt retirée de la batterie

Digitized by Google

et le registre fermé : le niveau disparut aussitôt dans l'indicateur et le joint de la conduite d'alimentation ayant été refait on dut injecter en chiffres ronds 1 500 litres d'eau dans la chaudière pour ramener le niveau au repère. La vapeur dans les tubes avait donc refoulé ce volume d'eau dans le réservoir, l'y avait maintenu, et le faisceau tubulaire était resté aux trois quarts vide d'eau.

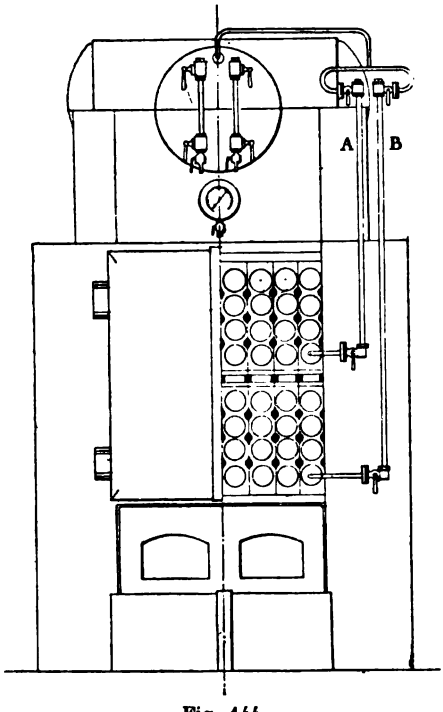


Fig. 144.

Dans les expériences de MM. Lethuillier et Pinel, de Rouen, dont une partie a été relatée page 170, une série d'observations a été relevée également sur une chaudière du type multitubulaire. La disposition des appareils de vérification est représentée figure 143. Pendant la mise en pression, les deux niveaux A, B et l'indicateur magnétique ont donné des indications toujours égales entre elles, mais le plan de niveau dans l'indicateur C baissait progressivement jusqu'à accuser une dénivellation de 230 millimètres. La chaudière ne fonctionnant pas au début des expériences, on ouvrit une soupape de sûreté pour produire

Digitized by Google

une dépense de vapeur : immédiatement l'eau disparut dans le niveau C. Il en fut de même lorsqu'à la reprise des observation on mit la machine en marche et qu'on fit fonctionner la pompe d'alimentation. Ces expériences n'ont été entreprises que dans le but de démontrer que la position des prises influe sur les indications des niveaux à tubes en verre et qu'il convient de les accompagner sur chaque générateur d'un indicateur magnétique qui échappe à ces causes perturbatrices. Aussi des chiffres relevés par MM. Lethuillier et Pinel nous ne pouvons tirer aucune conséquence utile pour le sujet qui nous intéresse, car nous ne connaissons ni la dépense de vapeur, ni les volumes de l'eau contenue dans le faisceau tubulaire et le réservoir, qui permettraient de calculer l'espace occupé par la vapeur dans les tubes : elles ne font que démontrer en principe les perturbations qui se produisent dans les chaudières multitubulaires.

Nous avons eu l'occasion de répéter ces expériences dans les conditions de la figure 144, sur la chaudière du service municipal d'éclairage électrique de l'entrepôt de Bercy. Les indicateurs de niveau d'observation étaient raccordés au milieu et au bas de la partie avant du faisceau tubulaire. Au repos, avec de l'eau à 100 degrés les quatre indicateurs accusaient le même plan de niveau d'eau. Dès la mise en feu, les indicateurs du faisceau tubulaire accusaient une dénivellation qui croissait avec la pression, et les indicateurs du corps cylindrique accusaient une élévation du niveau. Pendant toute la durée des expériences, les maxima, les minima et les moyennes des observations relevées de cinq en cinq minutes, ont été les suivantes :

	Minima	Maxima	Moyenne
Élévation du plan de niveau d'eau dans le corps cylindrique	80 m/m	170 m/m	115 m/m
Abaissement du plan de niveau d'eau dans l'indicateur A	140	310	321
Abaissement du plan de niveau d'eau dans l'indicateur B	330	590	472
Dénivellation entre les niveaux A et B	130	260	205
Dénivellation entre le niveau A et celui du corps cylindrique. . . .	290	480	400
Dénivellation entre le niveau B et celui du corps cylindrique	510	700	570

Digitized by Google

Lors de chaque lecture on purgeait les deux niveaux A et B au préalable, afin que la colonne d'eau dans les appareils fût à la même température que dans la chaudière, et éviter ainsi une erreur due à une différence de densité. La pompe alimentaire fonctionnait d'une façon continue : elle était réglée d'après la pratique du chauffeur, habitué à maintenir son niveau constant.

Toutefois pendant la durée des observations on l'arrêta trois fois pendant deux minutes.

Les minima notés au tableau qui précède correspondent à la remise en route de la pompe alimentaire : quoique l'injection de l'eau se fît dans la vapeur, l'eau d'alimentation, plus dense, tombait rapidement par le tuyau de retour à la partie basse du générateur et y provoquait la condensation d'un certain volume de vapeur, ce qui amenait dans le faisceau un volume d'eau égal, produisant l'abaissement du niveau dans le corps cylindrique et la montée dans les niveaux A et B.

Les autres valeurs relevées *au-dessous* des moyennes correspondent aux chargements de la grille. L'air frais qui s'engouffrait par les portes du foyer, produisait une condensation partielle de la vapeur qui remplissait les tubes de coups de feu, d'où phénomènes analogues à ceux produits par l'injection de l'eau d'alimentation.

Les valeurs des moyennes n'ont jamais été relevées directement, toutes les lectures leur ont été sensiblement inférieures ou supérieures : celles *au-dessus* correspondent aux moments de pleine activité du foyer.

Les deux appareils A et B n'indiquent évidemment pas un plan de niveau d'eau : ils fonctionnent comme des manomètres à eau, et ne donnent en réalité que la mesure de la colonne d'eau et de vapeur à l'intérieur du générateur. Les dénivellations ainsi constatées permettent d'évaluer d'une façon approximative la hauteur de la colonne de vapeur qui se trouve intercalée entre le plan de niveau d'eau et le plan de la prise.

Ces mesures ne peuvent être effectuées que pour la partie haute du générateur : si l'on voulait, par un dispositif analogue, mesurer la colonne de vapeur qui se forme dans les tubes de coup de feu en plaçant une prise au bas et à l'arrière du faisceau tubulaire, on obtiendrait des résultats inexacts, car en cet endroit

Digitized by Google

la colonne d'eau de l'indicateur se mettrait en équilibre avec celle du tuyau de retour d'eau. On obtiendrait une indication se rapprochant de celle des niveaux du corps cylindrique, mais dans certaines chaudières, Babcock et Wilcox par exemple, à cause de la disposition spéciale des tubes de retour d'eau, en poussant les feux on pourrait y créer des dénivellations importantes, car la vapeur qui se dégage par la partie basse des tubes de coup de feu monte dans le réservoir par les tuyaux de retour en bulles volumineuses occupant toute la section de ces tubes, ce qui diminue la charge d'eau au plan de la prise et provoque une dénivellation correspondante. Au contraire dans les appareils à tube de retour extérieur, de Naeyer, Roser et similaires, ce dernier phénomène ne peut être observé, car la vapeur dégagée par la partie basse des tubes de coup de feu se fraye un chemin par les collecteurs des éléments tubulaires et ne passe pas par le tube de retour, qui reste toujours plein d'eau et donne ainsi une charge constante sur le plan de prise de l'indicateur.

Les expériences que nous venons de relater nous donnent encore une nouvelle vérification expérimentale de l'absence de toute circulation d'eau dans les générateurs multitubulaires. La figure 145 indique le mode de prise qui avait été adopté pour les niveaux A et B de la figure 144. Celle-ci était placée dans le prolongement de l'axe du tube, et tout courant débouchant par le tube, devait inévitablement produire une montée de l'eau dans le tube en verre et non une dépression, en vertu du principe bien connu du tube de Pitot.

Comment l'eau destinée à remplacer celle qui s'est vaporisée arrive-t-elle donc sur les tubes de coup de feu ? Si la production est faible, à chaque ballon de vapeur qui se dégage par les communications dans le réservoir, un volume à peu près égal d'eau tombe par les collecteurs à la partie basse du générateur. L'eau descend par le chemin qu'on lui avait assigné pour monter. A mesure que la production augmente, les ballons qui se dégagent par les communications se succèdent à des intervalles de plus en plus rapprochés pour atteindre une limite de production à partir de laquelle le dégagement est continu.

Digitized by Google

Le tube de retour fonctionne seul alors, et l'eau descend enfin exclusivement par le chemin qui lui était tracé ; mais à ce moment la partie haute des tubes de coup de feu est pleine de vapeur, et n'étant plus rafraîchie par l'eau qui tombait par les collecteurs supérieurs du faisceau tubulaire, se surchauffe rapidement : c'est la période dangereuse du fonctionnement de ces appareils : celle où les tubes rougissent et se déchirent sous l'effort de la pression intérieure.

Nous avons vu qu'on a été amené à supprimer dans des chaudières à tubes d'eau construites sur le principe de la circulation, les tubes de retour, sans que le fonctionnement des appareils et leur qualité soient aucunement atteints par cette suppression. *The Engineer*, dans son numéro du 2 mars 1894, relate le cas d'un inventeur, lequel, ayant le courage de ses opinions, mit il y a quelques années à une chaudière multitubulaire de 30 chevaux nominaux anglais[1] un tube de retour d'eau colossal, 360 millimètres de diamètre. La chaudière fonctionna à l'entière satisfaction des intéressés ; quelques mois plus tard on supprima ce tube de retour, les ouvertures de communication par ce tube furent fermées par des brides pleines, et le fonctionnement de l'appareil continua à être tout aussi satisfaisant qu'auparavant.

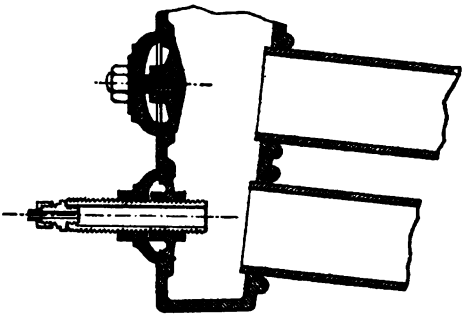


Fig. 145.

Ainsi aux allures normales l'eau descend, comme dans le cas de la chaudière à bouilleurs que nous avons examiné page 169, par le même chemin parcouru par la vapeur pour se dégager ; et c'est même là ce qui sauve les appareils multitubulaires dits à circulation, et permet d'en réaliser des applications industrielles, car sans ce renversement du principe sur lequel ils sont établis, les tubes de coup de feu seraient infailliblement détruits dès la mise en service.

[1] Cette dénomination doit correspondre à une cinquantaine de mètres carrés de surface de chauffe.

Digitized by Google

Le phénomène du remplissage par la vapeur des tubes de coup de feu n'a rien qui doive surprendre, puisque nous avons vu que dans les chaudières marines et dans les chaudières locomotives, des espaces beaucoup plus importants se vidaient d'eau, alors que la position verticale de ces conduits permet à la vapeur de se dégager au travers de la masse d'eau avec une facilité relative, qui est loin d'être offerte dans des tubes à faible section, avec une légère inclinaison, dans lesquels la vapeur doit parcourir un chemin horizontal énorme par rapport au chemin à parcourir verticalement. On peut répéter l'expérience du *Great Liverpool :* placer dans l'axe d'un tube de coup de feu un petit tuyau traversant le bouchon de nettoyage et terminé par un robinet : il ne s'écoulera par son orifice que de la vapeur.

Un autre moyen de vérification consiste à brancher un tuyau auxiliaire d'alimentation dans la partie basse de la chaudière de façon à pouvoir injecter l'eau aussi près que possible de l'extrémité arrière des tubes de coup de feu. En ayant un bon plein dans le générateur et en alimentant alors par le tuyau auxiliaire, on provoque la condensation de la vapeur contenue dans les tubes, et le niveau de l'eau disparaît dans les indicateurs presque instantanément, pour s'élever au-dessus du point de repère dès que l'alimentation auxiliaire cesse. Ce phénomène se présente du reste, mais avec beaucoup moins de rapidité, même avec l'alimentation normale, à l'eau chaude ou froide, dans la vapeur ou dans l'eau du corps supérieur.

Il y a longtemps du reste que ce fait avait été reconnu, et il est ici intéressant de reproduire le passage suivant de Peclet, *Traité de la Chaleur*, vol. II, dont la lecture est fort instructive, car elle donne leur juste valeur à tous les appareils multitubulaires dits à circulation d'eau, éclos de nos jours, et présentés comme le dernier mot de l'art de l'ingénieur en fait de générateurs de vapeur :

« Le baron Séguier a proposé vers 1834 une disposition particulière de chaudière à vapeur, qui avait particulièrement pour objet d'éviter les explosions, pour une machine de 20 chevaux ; elle se composait de 16 tubes de $0^m,16$ de diamètre sur 4 mètres de longueur. Sept tubes accolés formaient un plancher situé au-

Digitized by Google

dessus du foyer ; d'autres tubes accolés trois à trois dans des plans verticaux formaient trois cloisons, placées une de chaque côté du plancher, et l'autre au milieu. Les tubes du plancher, tous parallèles entre eux, avaient une inclinaison totale de $0^m,66$. Deux foyers se trouvaient sous leurs parties les plus élevées. Tous les tubes communiquaient entre eux et avec une chaudière placée au-dessus, qui ne servait que de réservoir d'eau et de vapeur. L'ensemble de l'appareil était renfermé dans une enveloppe de tôle. Enfin, le tirage était produit par un ventilateur à force centrifuge. Cet appareil avait l'avantage d'accumuler les dépôts dans la partie des tubes qui est la moins échauffée. M. Séguier a fait éclater un des bouilleurs : l'explosion a été faible, et tout s'est borné à un jet d'eau chaude : mais les jets d'eau chaude et la vapeur qui se forme instantanément sont malheureusement ce qui est le plus à redouter dans les explosions, car il y a plus de morts occasionnées par leurs effets que par la projection des parties des chaudières et des corps environnants. L'expérience a démontré, comme on pouvait s'y attendre, que dans cet appareil le grand nombre de joints donnait lieu à des fuites fréquentes ; que cette chaudière exigeait plus de soins pour l'entretien et plus de temps pour le nettoyage ; que la partie supérieure des tubes, celle qui est au-dessus des foyers, restait toujours constamment pleine de vapeur, et que, par suite, ces tubes étaient sujets à être brûlés. »

On objectera sans doute que puisque d'un côté on se trouve avoir une colonne entière de vapeur et de l'autre une colonne d'eau de même hauteur on devra avoir circulation en vertu même des principes que nous avons exposés, puisque la différence de densité des deux colonnes est ici bien tranchée, et qu'il n'y a plus de filets ou lames d'eau pouvant réaliser par leur continuité une charge d'eau égale dans les deux branches du tube en U élémentaire.

Ceci serait parfaitement exact si le tube n'était pas chauffé, mais, comme dans le cas de l'expérience de la figure 140, il vaporise, et dans la partie où se trouve cantonnée l'eau, les molécules liquides, qui sont soumises à la charge de la colonne d'eau du tuyau de retour, ne peuvent se vaporiser qu'à la température

Digitized by Google

correspondante à une force élastique faisant équilibre aux pressions supportées. La vaporisation étant des plus actives aux tubes de coup de feu, la vapeur qui s'y produit et se renouvelle sans cesse refoule d'un côté la colonne de vapeur dans le réservoir et de l'autre se met en équilibre avec la colonne d'eau qui tendrait à la chasser. Si les frottements et les contractions que doit vaincre la vapeur pour se dégager acquièrent, soit par la disposition du générateur, soit par l'importance du débit, une valeur assez grande, la tension de la vapeur va en augmentant pour vaincre ces résistances, et refoule de plus en plus l'eau vers le bas des tubes jusqu'au moment où le tube étant complètement rempli de vapeur, celle-ci peut se dégager par les deux extrémités à la fois.

Ici se pose naturellement une question : puisque les tubes de coup de feu se dégarnissent aussi facilement d'eau, ils devraient inévitablement rougir, et faire très fréquemment explosion, alors que le nombre des accidents de cette nature est fort heureusement assez faible si on le compare à celui des appareils en service.

C'est en effet ce qui se passe : les tubes de coup de feu sont toujours à une température très élevée, entre le rouge naissant et le rouge sombre : l'éclat du foyer et de ses parois empêche l'observation directe de cette coloration, dont les tubes refroidis portent des traces manifestes : quant au défaut d'une plus grande fréquence d'explosions qui en seraient la cause, cela est uniquement dû à ce que les tubes qu'on emploie ont encore à ces hautes températures une résistance suffisante pour contrebalancer la pression intérieure. Les tubes en acier doux qui sont aujourd'hui employés de préférence dans les générateurs multitubulaires peuvent résister à froid à des pressions considérables, qu'il est facile de calculer. En pratique, un tube de 100 millimètres de diamètre extérieur, et $3^{m}/^{m},5$ d'épaisseur, est éprouvé à froid aux forges à une pression de 50 kilos par centimètre carré : on maintient la pression pendant un certain temps, afin de marteler le tube le long de la ligne de soudure, et s'assurer qu'elle reste dans ces conditions absolument étanche. Or la résistance de ce tube au rouge naissant (525°) est encore 60 p. 100 de sa

Digitized by Google

résistance à froid : au rouge sombre (700°) de 33 p. 100. Il pourra donc soutenir encore dans le premier cas une pression intérieure de 30 kilos, dans le deuxième cas de 17 kilos. On donne ordinairement aux tubes de coup de feu en 100 millimètres de diamètre, des épaisseurs de 4,5 à 5 millimètres : il n'y a donc rien de surprenant à ce que ces tubes portés constamment au rouge supportent sans faire explosion avec leur épaisseur normale une pression intérieure de 8 à 10 kilos.

Nous avons été souvent à même de constater que des températures encore plus élevées sont atteintes par les tubes de coup de feu, sans qu'ils viennent à crever : un accident très fréquent dans les chaudières à tubes d'eau lorsque ceux-ci sont dudgeonnés dans les collecteurs, c'est le déboîtage des tubes. Presque toujours dans ces avaries on observe un cintrage très prononcé et à faible rayon de l'extrémité déboîtée, cintrage dû uniquement à la réaction de l'écoulement de la vapeur et qu'on ne saurait produire à la forge, si l'on veut courber un tube, qu'en le chauffant à l'orangé.

Rendement des chaudières multitubulaires. — Les chaudières multitubulaires donnent en général de la vapeur très chargée d'eau entraînée : cette quantité est parfois tellement considérable qu'elle peut atteindre 50 p. 100 de l'eau d'alimentation : elle descend très rarement en dessous de 20 p. 100. Les hauts rendements que l'on attribue à ces appareils ne sont qu'apparents (voir p. 249).

L'examen des dispositions qu'ils présentent pour l'absorption de la chaleur en révèlent immédiatement l'inefficacité.

La plus grande partie de la chaleur rayonnante du foyer est perdue. Généralement on croit que si celle-ci n'est pas absorbée, elle concourt à l'élévation de la température des gaz de la combustion : mais les quelques données expérimentales que nous possédons sur la matière semblent vouloir détruire cette hypothèse. Ainsi, dans l'expérience de M. Durston relatée page 108, la température maxima qu'il a pu réaliser pour les gaz chauds a été de 1 700°, et nous avons vu que, faute d'absorption de la chaleur rayonnante, le rendement était mauvais. Pour des

Digitized by Google

motifs qui nous échappent il paraîtrait donc que si la chaleur rayonnante n'est pas absorbée immédiatement, on ne peut la retrouver sous une autre forme. C'est pour mettre à profit ces enseignements que nous avons vu adopter dans la chaudière Root la disposition de la figure 102, où les parois latérales du foyer sont formées par des éléments tubulaires, mais les complications de construction et d'entretien qui s'ensuivent, ne rendent pas ce perfectionnement d'une application facile.

Les surfaces de chauffe développées par les tubes ne sont pas utilisées entièrement. Un regard jeté aux parcours des gaz sur les différentes figures qui donnent l'ensemble de chaudières multitubulaires, fera reconnaître que les deux tiers environ de la surface sont en contact avec les gaz chauds, la zone hachurée, figure 146 *a*, est absolument improductive : l'absence de tout courant et les remous qui s'y produisent y font accumuler les suies, figure 146 *b*, qui s'opposent à toute absorption de la chaleur.

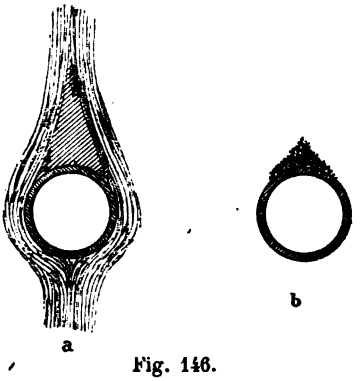


Fig. 146.

Si la direction du courant gazeux était parallèle à l'axe du tube, la totalité de la surface serait léchée par les produits de la combustion, mais pour réaliser dans ce cas une bonne utilisation il faudrait que le chauffage fût méthodique et le faisceau tubulaire disposé de façon à diviser le courant gazeux en lames très minces. Une pareille disposition n'est pas possible avec le tirage naturel par cheminée qui exige des sections de passage considérables, mais elle peut facilement être réalisée par l'emploi du tirage mécanique. Nous verrons, au chapitre XVIII, tous les autres avantages que présente ce dernier système, qui jouit d'une déconsidération d'autant plus grande qu'elle est mal fondée.

On dira généralement que pour que le maximum de transmission de chaleur soit obtenu il faut que les gaz chauds frappent normalement la surface de chauffe, au lieu de cheminer le long de

Digitized by Google

celle-ci. Cela est vrai pour la chaleur rayonnante seulement, mais n'est pas exact pour l'échange des températures par contact, lequel ne requiert qu'une seule condition : le remplacement rapide et successif des molécules gazeuses ayant abandonné aux surfaces de chauffe une partie de leur chaleur par d'autres plus chaudes, remplacement qui peut être obtenu beaucoup plus facilement par un écoulement parallèle aux surfaces que par une direction normale.

Les chaudières tubulaires sont en effet celles qui donnent au point de vue de l'utilisation du combustible les meilleurs rendements, lorsque la combustion a été parfaite avant l'entrée des gaz dans les tubes : la surface de chauffe y est loin d'être frappée normalement par les courants de gaz chauds, tandis que dans les chaudières multitubulaires où ce dernier principe est établi, on n'atteint des résultats économiques comparables à ceux des autres générateurs que par l'addition de réchauffeurs ou économiseurs. Ces appareils qui forment en réalité une deuxième chaudière placée à la suite de la première, d'une surface de chauffe considérable, parfois égale à celle du générateur, renvoyent les gaz à la cheminée à une température très basse, de beaucoup inférieure à celle correspondante à la pression dans la chaudière même, alors que dans les générateurs tubulaires l'utilisation correspondante est obtenue avec des gaz s'échappant à 250°, et serait notablement améliorés par l'addition d'un économiseur.

On trouvera au chapitre XVI les rendements industriels en vaporisation apparente de quelques types de chaudières multitubulaires, avec et sans réchauffeurs.

Mais à l'appui de la remarque qui précède nous relaterons ici les résultats comparatifs obtenus par le comité des essais de l'Exposition de Francfort en 1891, sur les chaudières suivantes :

1° Chaudière cylindrique à un foyer intérieur, type normal.

2° Chaudière multitubulaire, à tube intérieur, genre Collet, Dürr, etc. Le foyer, partagé en deux par un mur, comportait deux grilles qu'on chargeait alternativement : disposition qui améliore la combustion.

3° Chaudière multitubulaire, semblable à la précédente, mais

Digitized by Google

avec une disposition de foyer encore plus perfectionnée. Il était sectionné en trois par deux murs, et toutes les portes de nettoyages étaient garnies de joints à l'amiante pour empêcher les rentrées d'air.

4° Chaudière formée de l'assemblage de trois chaudières verticales, réunies par des communications pour l'eau et pour la vapeur : chacune des trois sections se composait de deux corps cylindriques réunis par un faisceau de tubes d'eau, le tout placé verticalement. Le foyer était du système « Caris ».

5° Chaudière multitubulaire genre Babcock et Wilcox, de Naeyer, etc., à dix tubes d'eau en hauteur, foyer du type ordinaire.

6° Chaudière multitubulaire, même genre que la précédente mais à quatre tubes seulement en hauteur, foyer alimenté avec de l'air chauffé au préalable.

Essais comparatifs d'entraînement d'eau.

Le propriétaire de la chaudière n° 5 s'étant opposé à ce qu'on fit des essais d'entraînement sur son générateur, ceux-ci n'eurent lieu que sur les cinq autres.

En prenant pour unité l'entraînement de la chaudière à foyer intérieur, les résultats obtenus ont été :

N° 1	Chaudière à foyer intérieur		. . . . .	1,
N° 2	—	multitubulaire, tubes inclinés	. . . .	1,47
N° 3	—	— —	. . . .	1,78
N° 4	—	— tubes verticaux	. . .	1,12
N° 6	—	— tubes inclinés	. . . .	2

Essais comparatifs de vaporisation.

EAU VAPORISÉE PAR MÈTRE CARRÉ DE SURFACE DE CHAUFFE ET PAR HEURE (vaporisation apparente)

N° 1	Chaudière à foyer intérieur		. . . . .	24,75 litres.
N° 2	—	multitubulaire à tubes inclinés	. .	14,74 —
N° 3	—	— —	. .	16,24 —
N° 4	—	— à tubes verticaux	.	13,23 —
N° 5	—	— à tubes inclinés	. .	14,49 —
N° 6	—	— —	. .	13,95 —

Digitized by Google

EAU D'ALIMENTATION PAR KILOGRAMME DE CHARBON
(vaporisation apparente)

N° 1	Chaudière	à foyer intérieur	8,62	litres.
N° 2	—	multitubulaire à tubes inclinés. .	7,40	—
N° 3	—	— — . .	8,12	—
N° 4	—	— à tubes verticaux .	8,48	—
N° 5	—	— à tubes inclinés. .	8,34	—
N° 6	—	— — . .	8,69	—

Il résulte de ces essais que la chaudière ordinaire à foyer intérieur, quoique ayant fonctionné à une allure forcée, a donné de meilleurs résultats que les chaudières multitubulaires fonctionnant à des allures modérées, et malgré l'application de systèmes de foyers perfectionnés.

Digitized by Google

CHAPITRE XV

CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES DE TORPILLEURS

Chaudières multitubulaires de torpilleurs. — Cette variété de générateurs a pour caractéristique l'emploi de faisceaux composés

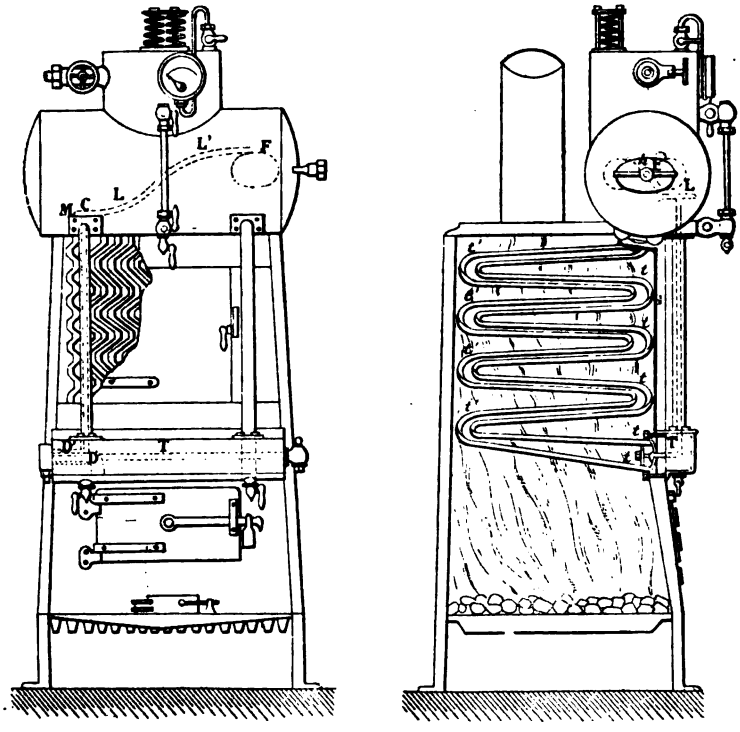


Fig. 147.

d'un grand nombre de tubes d'eau de petit diamètre. Elle a été créée pour répondre aux exigences du service des torpilleurs : maximum de pression et de production avec minimum de poids

Digitized by Google

et d'encombrement; c'est le type dénommé *Chaudière express* en Angleterre. La première solution de ce problème a été donnée en France par M. du Temple. La figure 147 indique la première disposition de M. du Temple, inspiré des travaux de Perkins et

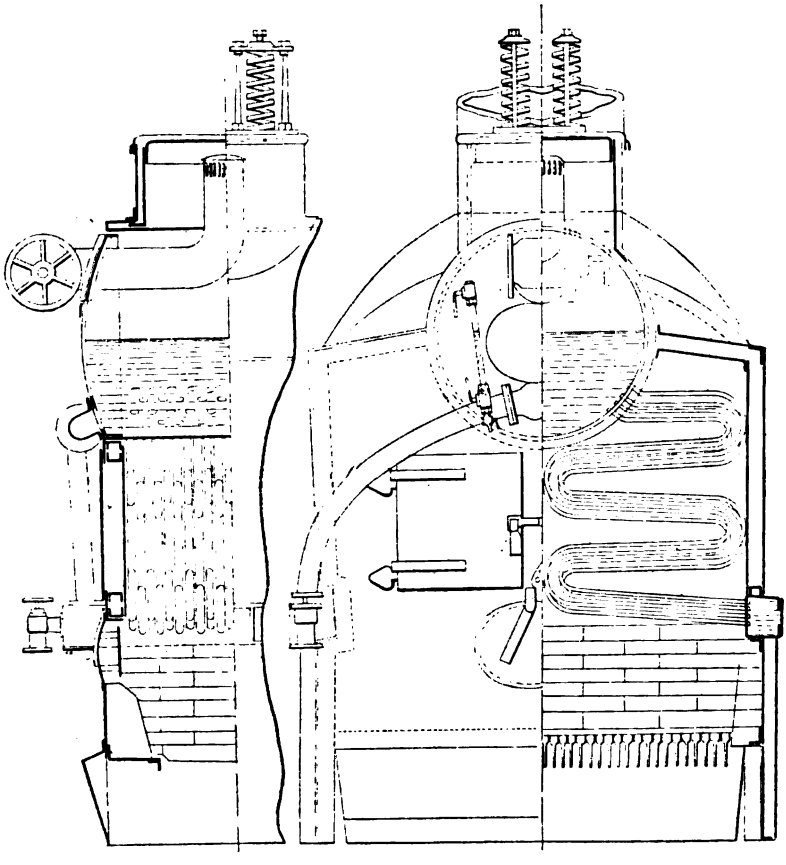


Fig. 148.

de Belleville : la figure 148 le dispositif adopté par la suite, et qui, comme on le voit, se compose essentiellement de deux générateurs du type primitif placés symétriquement avec réservoir et grille commune. Enfin la figure 149 représente le dernier type du Temple, de création toute récente. Ces dispositifs ont inspiré à de nombreux constructeurs en France, en Angleterre, aux Etats-Unis de l'Amérique du Nord, des variantes et des perfectionnements de construction qui toutes résident principalement dans la

Digitized by Google

disposition et la forme donnée aux tubes qui en composent les faisceaux. Les deux types les plus perfectionnés qui existent actuellement sont ceux de M. Thornycroft et de M. Yarrow; ils ont entre eux une différence bien marquée. Nous nous bornerons à

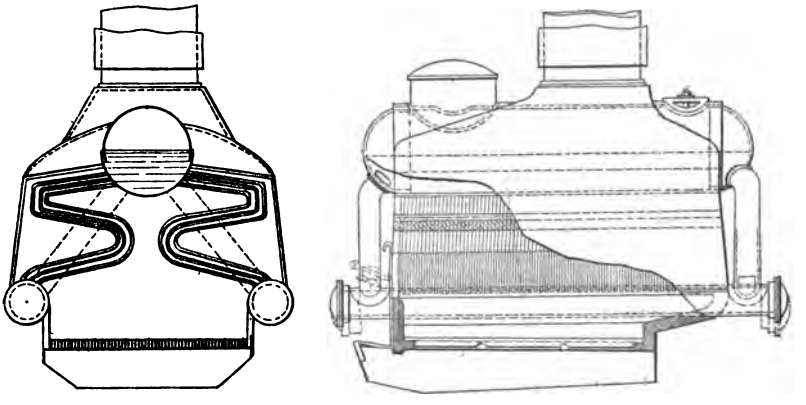


Fig. 149.

décrire et discuter ces deux appareils à vapeur, auxquels on pourra rapporter les nombreuses variantes qui ont été réalisées; elles tiennent de l'un ou de l'autre système, ou des deux à la fois.

Chaudière Thornycroft. — Une des premières dispositions adoptées pour ce générateur est représentée par la figure 150.

Le collecteur de vapeur est mis en communication par deux faisceaux tubulaires avec deux bouilleurs, placés au voisinage et de part et d'autre du foyer. Ces tubes sont disposés par groupes de huit et dans chacune des séries, ils se trouvent situés dans un même plan vertical ou à peu près. C'est du haut des bouilleurs qu'ils partent pour aboutir également à la partie supérieure du réservoir cylindrique principal.

Les groupes de tubes sont placés côte à côte et disposés de telle sorte que les deux séries de deux tubes extérieurs et intérieurs de chaque faisceau forment des cloisons sur toute la longueur, sauf à l'arrière pour les rangées intérieures.

Ces cloisons ménagent entre elles, des deux côtés de la grille, les carneaux de retour des gaz chauds.

Le premier et le dernier groupe de tubes n'ont pas la même

Digitized by Google

disposition que les autres ; ils sont aménagés de façon à former aussi des cloisons à chacune des extrémités et à fermer ainsi les faisceaux tubulaires.

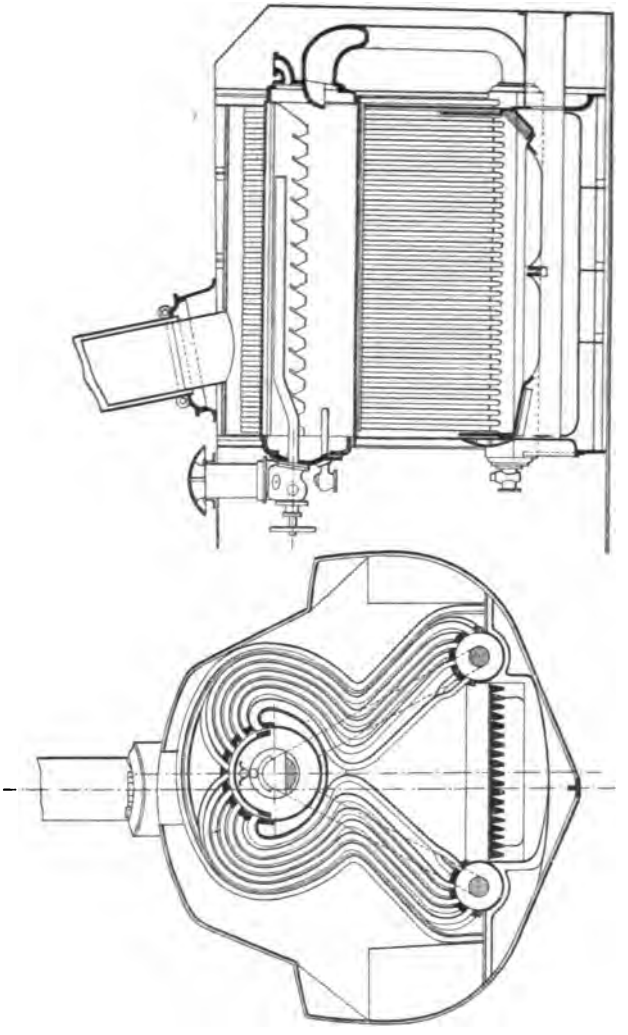


Fig. 150.

Pour protéger la partie inférieure du collecteur de vapeur contre l'action des flammes, on dispose en dessous une armature formée de matière isolante, de la toile d'amiante, par exemple, qui est reliée aux cloisons tubulaires intérieures et constitue le plafond du foyer.

Digitized by Google

Enfin, tout à fait à l'arrière, on a établi un tuyau très court qui sort de la chaudière et sert à l'échappement de la vapeur au cas où l'un des tubes viendrait à crever.

On voit, à l'examen de la figure 150, que le tuyau de prise de vapeur règne sur la plus grande partie de la longueur du collecteur, où le passage direct de la vapeur dans ce tuyau est empêché par une plaque recourbée et échancrée latéralement. La vapeur et

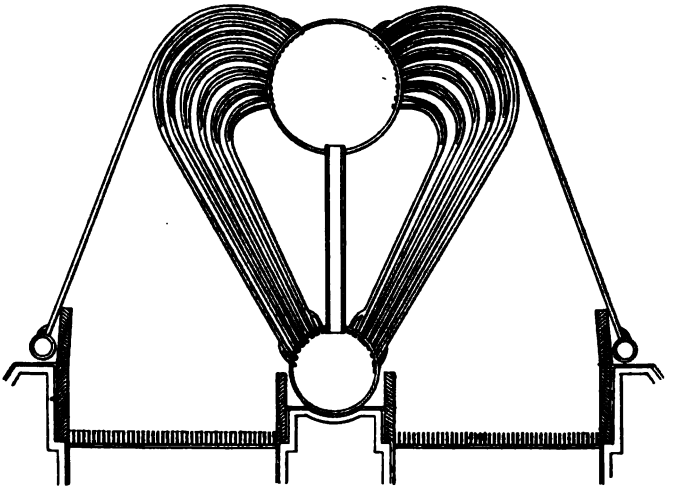


Fig. 151.

l'eau arrivent sur cet écran. L'eau retombe à la partie inférieure du réservoir et retourne dans les bouilleurs par les tubes de retour.

Le type adopté récemment par M. Thornycroft est représenté schématiquement figure 151. Les deux faisceaux tubulaires sont insérés à la partie inférieure sur un seul réservoir d'alimentation, et le foyer unique central est divisé en deux foyers latéraux. Les tubes de retour d'eau, en nombre assez grand occupent la partie centrale du générateur et sont chauffés par les gaz en troisième retour. La paroi extérieure des foyers est formée par une série de tubes accolés placés dans le même plan, et insérés dans un petit collecteur d'alimentation.

Nous extrayons de la communication faite par M. Thornycroft (mars 1894) à la Société des Ingénieurs de constructions navales à Londres, les avantages qu'il réclame en faveur de ce nouvel arrangement.

Digitized by Google

« Cette disposition, tout en rendant la chaudière plus compacte, permet l'emploi d'une grille à grande surface dans un emplacement déterminé. Cet avantage est encore accru si l'on accouple les générateurs, en supprimant les parois latérales des foyers dans les chaudières isolées.

« La figure 152 montre une disposition d'ensemble, dans laquelle chaque batterie se compose de sept générateurs ainsi accolés, quatre batteries semblables étant desservies par quatre chambres de chauffe, donnant ensemble 5575 mètres carrés de surface

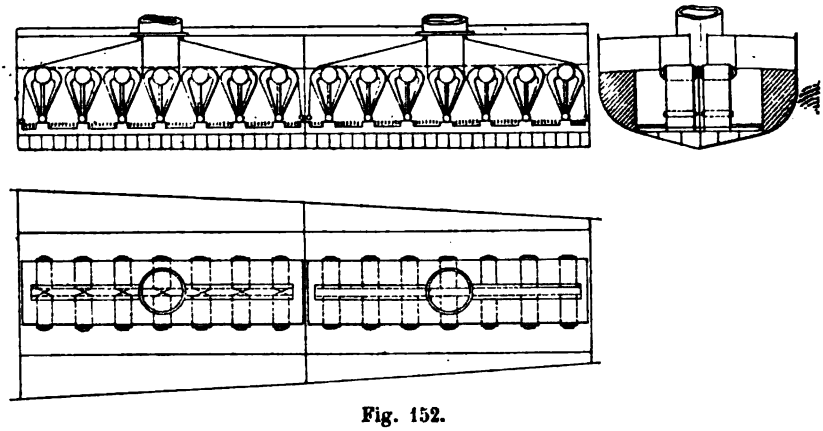


Fig. 152.

de chauffe. J'ai ainsi pu placer un maximum de surface de chauffe dans un emplacement limité, et les chaudières étant placées au centre du navire, l'accès aux soutes est facile et les chaufferies sont à basse température. Le fait d'avoir ainsi formé un tout de plusieurs chaudières présente de nombreux avantages, et simplifie les enveloppes, tout en les réduisant peut-être à un minimum. De même, le départ des gaz sur la ligne médiane du navire rend les aménagements de carneaux allant à la cheminée d'une exécution très facile et simple.

« Puisque chaque grille est commune à deux chaudières, un générateur ne peut être mis hors service sans que la moitié de la surface de chauffe des chaudières voisines soit inutilisée, mais celles-ci continueraient à fonctionner à moitié puissance, car l'autre faisceau tubulaire n'en serait pas affecté. Je ne considère donc pas cela comme une objection importante. Les grandes

Digitized by Google

chambres de combustion qui sont aménagées au-dessus des foyers assurent la combustion complète des gaz dégagés sur la grille. »

Les réservoirs d'alimentation dans ces chaudières n'ont parfois que 250 millimètres de diamètre : il est impossible dans ces conditions de mandriner par les procédés ordinaires l'extrémité des tubes qui y sont insérés. M. Thornycroft a résolu le problème en créant un outil spécial dudgeonnant d'équerre, par engrenage, qui est introduit par l'un des bouts du collecteur, et qui, amené successivement dans chaque extrémité des tubes, les mandrine aussi parfaitement que si l'opération était faite dans les conditions ordinaires. La possibilité d'obtenir ainsi un dudgeonnage régulier, étanche à l'eau et à la vapeur, à $1^m,500$ ou $1^m,600$ de distance, loin des yeux de l'opérateur, est la réalisation d'un progrès énorme dans l'art du constructeur de chaudières.

Chaudière Yarrow. — La figure 153 donne la disposition d'ensemble de ce générateur, qui se compose comme la chau-

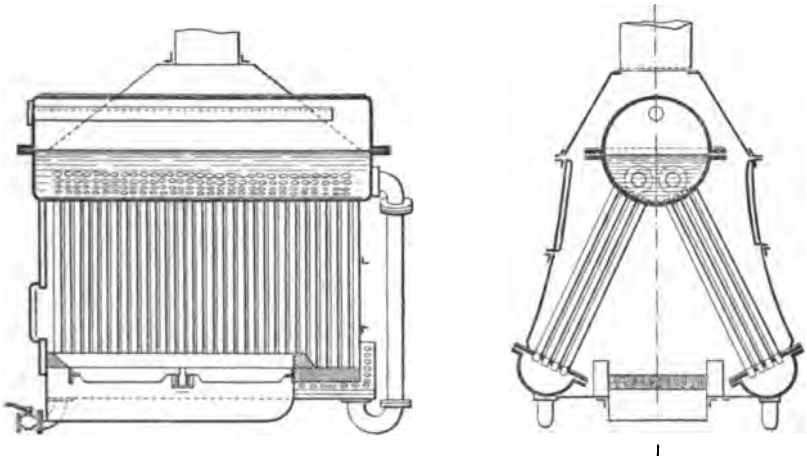


Fig. 153.

dière du Temple et la chaudière Thornycroft, d'un réservoir central d'eau et de vapeur placé à la partie supérieure, de deux réservoirs d'alimentation à la partie basse, réunis par les deux faisceaux tubulaires formant la surface de chauffe et, à l'origine, par quatre tubes de diamètre moyen, deux à chaque extrémité, formant retours d'eau. Le réservoir de vapeur est formé

Digitized by Google

de deux demi-cylindres boulonnés ensemble par des brides rectangulaires, et les réservoirs d'alimentation se composent d'une plaque tubulaire droite à laquelle vient se boulonner un demi-cylindre. De la sorte on a un accès facile aux deux extrémités des tubes : les faisceaux, les plaques tubulaires, et le demi-cylindre supérieur dans lequel les tubes viennent s'insérer, sont au préalable galvanisés, moyen adopté pour combattre les corrosions extérieures qui attaquent violemment ces générateurs dès qu'ils sont au repos. Ce qui différencie essentiellement cet appareil de la chaudière Thornycroft, c'est que les tubes sont droits et qu'ils débouchent au-dessous du plan de niveau d'eau dans le réservoir supérieur. Les produits de la combustion montent directement à la cheminée en traversant le faisceau tubulaire et en léchant le réservoir supérieur.

Fonctionnement des chaudières Express. — En passant à la discussion du fonctionnement de ces appareils, la première question qui se pose est celle relative à la disposition générale des tubes, courbés ou droits. Les partisans des tubes droits invoquent l'avantage qu'ils présentent de pouvoir être vérifiés intérieurement à l'œil, d'un bout à l'autre, ce qui est impossible pour les tubes courbés. Ceux des tubes courbés soutiennent que cette forme se prête aux dilatations à cause de son élasticité et supprime tout effort anormal de ce chef sur les plaques tubulaires : ce à quoi les premiers répondent que l'emploi de tubes courbés nécessitant l'entretoisement des parties cylindriques de la chaudière entre elles, les tirants s'allongent moins que les tubes, car ils ne sont pas soumis à la même température : si les tubes ne sont pas à grande courbure, un faible allongement correspond à un grand accroissement du rayon de courbure, ce qui, joint aux variations continues de ce rayon avec les températures, est un élément de destruction rapide des tubes. Au contraire si ceux-ci sont droits ils se prêtent bien aux dilatations linéaires, et dans l'ensemble du faisceau on peut considérer cette dilatation comme uniforme, les différences qui peuvent se rencontrer étant compensées par l'élasticité du métal. En outre, dans la chaudière Yarrow, un seul type de tubes est adopté, et ceux-ci peuvent être individuellement remplacés.

Digitized by Google

tandis que dans le générateur Thornycroft les rechanges se composent forcément de plusieurs séries de tubes différents de formes, et sauf ceux à la partie extérieure des faisceaux, le remplacement d'un tube intérieur exige la destruction de plusieurs autres tubes. Enfin le tube droit diminue considérablement le coût de la construction. Le tube courbé a pour lui l'avantage de permettre de placer une plus grande surface de chauffe dans un même volume que les tubes droits.

En passant à l'examen de la circulation de l'eau dans ces appareils, nous pourrons facilement nous rendre compte du fonctionnement de ces chaudières par les expériences de laboratoire précédemment citées, et dont les résultats nous donneront des indications d'autant plus utiles que nous pouvons employer des diamètres de tubes égaux à ceux adoptés pour la construction des appareils. Nous réaliserons la chaudière Thornycroft par le dispositif de la figure 154. Si après avoir amené toute la masse d'eau à la température de 100°, nous chauffons le tube, nous verrons que les bulles de vapeur qui s'y forment occupent par moment toute la section du tube et qu'elles refoulent alors simultanément la colonne d'eau qui se trouve au-dessus d'elles dans le tube, et celle qui se trouve en dessous (fig. 155). Lorsque la colonne d'eau supérieure arrive au débouché du tube au-dessus du plan de niveau d'eau et qu'une partie se déverse, toute la colonne fluide dans le tube est violemment projetée par l'ouverture supérieure : le tube se remplit alors d'eau et le niveau s'établit en équilibre avec celui du ballon comme en *b* de la figure 154, jusqu'à ce que la formation d'une nouvelle bulle de vapeur vienne reproduire la même série de phénomènes. Le fonctionnement de ces tubes est donc intermittent, et leur extrémité supérieure déverse de l'eau suivie d'un dégagement de vapeur, chaque déversement étant séparé du suivant par un intervalle de repos.

Ceci explique les inconvénients auxquels on s'est heurté en pratique dans les applications des chaudières du type Thornycroft, c'est-à-dire avec les tubes débouchant au-dessus du niveau de l'eau. Pendant les intervalles de repos toute la partie CD de ces tubes se surchauffe ; elle se refroidit avec une brusque contraction (effet que nous aurons l'occasion d'étudier au chapitre XVII)

Digitized by Google

lorsque l'eau soulevée parcourt cette partie, et de là rupture des tubes en cet endroit après quelques heures de marche, inconvénient très grave qui ne se présente pas lorsque le débouché du tube est en dessous du plan de niveau d'eau.

Il n'y a donc pas dans la chaudière Thornycroft de circulation

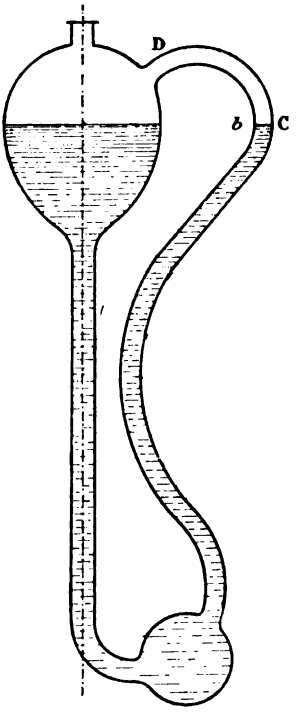


Fig. 154.

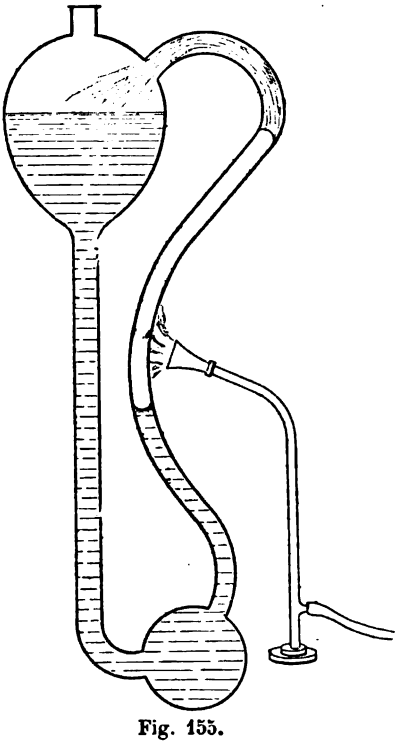


Fig. 155.

dans le véritable sens du mot, mais remplacement, à des intervalles plus ou moins rapprochés, de la colonne d'eau qui remplit les tubes.

On conçoit, d'après les considérations qui précèdent, que lorsque la vaporisation est poussée à un certain degré d'activité, la présence dans le tube, pendant un intervalle très court, d'une colonne liquide sans ébullition devient impossible : le tube sera alors constamment rempli de vapeur, l'eau qui arrive par la partie basse étant immédiatement vaporisée.

Cette déduction théorique a été confirmée expérimentalement par les essais préliminaires de l'aréoplane de M. Maxim, dont la chaudière est du type Thornycroft (voir *Engineering* du

Digitized by Google

10 août 1894). Cette chaudière, d'environ 75 mètres carrés de surface de chauffe, devait alimenter deux moteurs compound, très perfectionnés, d'ensemble 370 chevaux, avec de la vapeur à 21 kilos et de l'eau d'alimentation préalablement réchauffée à 110°, ce qui correspondrait à environ 50 litres d'eau à 0° vaporisés par mètre carré de surface de chauffe et par heure. Lors du premier essai, et avant d'atteindre cette production, la chaudière fût brûlée.

Le remède apporté par M. Maxim a été la circulation forcée de l'eau : à cet effet le refoulement de la pompe alimentaire se prolonge dans les retours d'eau : un système de tuyère à ressort ne donne passage à l'eau dans la direction des surfaces de chauffe qu'avec une surpression de plus de 2 kilos sur la pression de la chaudière. Dans ces conditions la charge d'eau étant supérieure d'une hauteur de colonne de plus de 21 mètres à la force élastique de la vapeur au moment où elle se dégage, les tubes sont effectivement parcourus par des colonnes liquides qui balayent la chaleur absorbée par les parois métalliques et en empêchent la surchauffe. Avec ce dispositif la chaudière de l'aéroplane de M. Maxim a pu donner la puissance de vaporisation qui lui avait été assignée.

Dans la chaudière Yarrow, le dégagement de la vapeur se fait aussi par intermittences, ainsi que nous avons eu l'occasion de le constater dans le résumé de nos expériences sur les tubes en U, mais le remplissage se fait par ses deux extrémités à la fois : si l'on supprime le retour d'eau, le remplissage se fera exclusivement par la partie haute, et c'est ce qui explique pourquoi M. Yarrow a pu supprimer les tubes de retour d'eau de ses chaudières sans que le fonctionnement en soit modifié, ce qui ne saurait se tenter dans les types Thornycroft, où le tube de retour est une nécessité indispensable. Les tubes droits ou courbes, débouchant en dessous du niveau de l'eau, n'ont pas l'inconvénient de ceux du type Thornycroft, car pendant la période de formation de la bulle de vapeur, toutes leurs parties sont remplies d'eau, aussi tiennent-ils mieux à l'usage que les tubes courbés débouchant au-dessus du plan d'eau.

Il n'y a donc pas de circulation, c'est-à-dire de mouvement initial continu de toute la masse d'eau, dans aucun de ces types de générateurs, mais le fait d'amener l'eau en contact avec les sur-

Digitized by Google

faces de chauffe, à des intervalles réguliers et très rapprochés, a permis d'atteindre des vaporisations considérables par mètre carré de surface de chauffe, 30 à 35 litres d'eau par heure.

Nous avons été heureux de trouver dans la communication faite par M. Thornycroft (Mars 1894) à la Société des Ingénieurs des Constructions navales de Londres, la confirmation pratique des expériences de laboratoire que nous avions réalisées ; cet

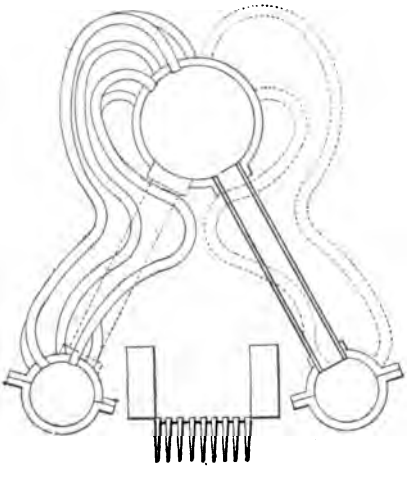


Fig. 156.

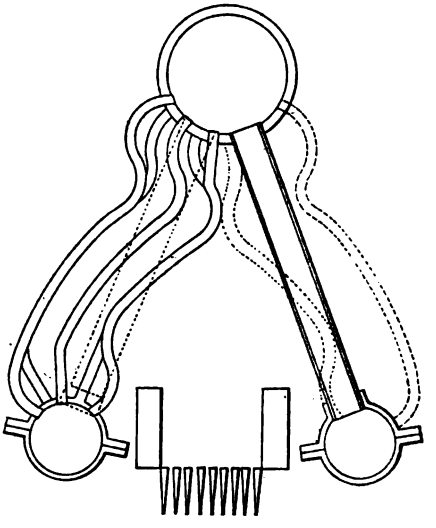


Fig. 157.

ingénieur a opéré sur des chaudières d'expériences munies de regards en verre. Dans ces appareils (fig. 156 et 157), qui n'avaient qu'un seul faisceau tubulaire, M. Thornycroft dit avoir établi un barrage à déversoir dans le corps cylindrique supérieur, ce qui lui a permis de jauger *à l'œil* le volume d'eau élevé par les tubes et y revenant par les retours. Il suffit d'indiquer les conditions dans lesquelles ce mode de mesure a été réalisé pour reconnaître l'inexactitude des chiffres qu'on en a déduit. Dans sa conférence M. Thornycroft s'étend assez longuement sur les questions d'entraînement d'eau dans ces types de générateurs, et nous croyons intéressant de traduire ici les passages relatifs à cette question :

« Dans les chaudières d'expériences dont j'ai parlé, j'ai fait des observations sur les entraînements d'eau, et les phénomènes qui

Digitized by Google

se produisent sont importants et intéressants. Les eaux qui occasionnent les entraînements produisent une mousse formée d'un amas de bulles de différentes grandeurs. Les très mauvaises eaux donnent naissance à des bulles tellement persistantes, que l'espace de vapeur peut en être entièrement rempli : aussitôt que cela se produit, au lieu de vapeur, c'est de la mousse qui s'écoule et se dissocie dans les conduites de vapeur. Le contraste est frappant avec le cas de l'eau pure : il n'y a presque pas de formation de bulles, ce à quoi il fallait s'attendre, puisqu'on sait que l'eau pure ne peut pas en produire. Cet effet est très marqué en observant le refoulement des tubes, qu'ils débouchent au-dessus ou au-dessous de l'eau. Dans le premier cas, avec de l'eau pure la décharge de la vapeur et de l'eau est intermittente : l'eau et la vapeur ont des périodes de dégagement distinctes, mais avec de l'eau *entraînante* la décharge est continue et consiste en un mélange d'eau et de vapeur sous forme d'une mousse très humide.

« Lorsque l'ouverture des tubes se trouve en dessous du plan de niveau d'eau, la décharge apparaît irrégulière dans les deux cas : lorsque l'eau est pure, la vapeur et l'eau sont refoulés séparément, comme dans le cas de la décharge au-dessus de l'eau, et pendant l'intermittence l'eau s'introduit par le haut dans le tube à l'encontre de la colonne ascendante, de telle sorte que la partie supérieure des tubes est le siège de courants d'eau alternatifs de sens contraires. Ceci se produit également dans le cas d'eau *entraînante;* mais le phénomène est plus marqué, des colonnes de mousse étant projetées contre les parois opposées du réservoir[1]. Ainsi les tubes noyés peuvent produire de l'entraînement, là où les tubes débouchant au-dessus du niveau de l'eau n'en produisent pas.

« Les impuretés de l'eau qui occasionnent les entraînements ne sauraient être facilement déterminées. On sait que des qualités d'eau qui ne sont pas *entraînantes* prises séparément, le deviennent d'une façon étonnante si on les mélange : ainsi l'eau pure ou l'eau salée peuvent être employées pour l'alimentation sans produire

[1] La force vive de la masse fluide ainsi projetée serait-elle suffisante pour lui faire traverser la nappe d'eau? Il est permis d'en douter. Le désir de critiquer un système concurrent nous paraît ici *entraîner* un peu M. Thornycroft.

Digitized by Google

d'entraînements, mais en les mélangeant on provoque des entraînements considérables. J'ai essayé l'eau de la Tamise puisée à Nore et de l'eau de puits de Sheerness : toutes deux sont de bonnes eaux entraînantes, et qui à l'allure la plus modérée produisent une mousse violente. Comme ce mélange était employé pendant une partie de la durée des essais du *Speedy*, on s'explique les entraînements constatés[1]. »

Il ressort clairement de ce qui précède que, malgré toutes les précautions prises, ce type de générateur donne encore lieu à des entraînements d'eau importants.

Dans ces chaudières à très faible volume d'eau, et à très grande puissance de vaporisation, l'alimentation est très délicate et doit être assurée d'une façon absolue et très régulière. M. Yarrow sur le *Hornch* a résolu ce problème en établissant une alimentation à deux étages. Les pompes alimentaires des machines aspirent l'eau des condenseurs et la refoulent dans un réservoir à trois kilos de pression. Chaque chaudière est munie d'un petit cheval qui aspire dans ce réservoir. De la sorte on assure l'arrivée de l'eau à l'aspiration des pompes, et l'on peut réduire le diamètre des tuyaux d'aspiration à cause de la vitesse de l'eau qui y circule sous une pression de trois kilos : un tuyau de décharge ramène le trop-plein à l'aspiration des pompes des machines, dont le débit est supérieur à celui nécessaire à l'alimentation des chaudières.

Comme dans tous les générateurs, les eaux grasses d'alimentation produisent dans les chaudières multitubulaires de torpilleurs des troubles profonds : mais dans ce type les effets se manifestent avec une rapidité excessive, tout le faisceau tubulaire se détériorant en quelques heures.

Dans toutes ces chaudières l'utilisation est sacrifiée à la puissance de production : elles vaporisent environ 5 à 6 litres d'eau prise à 0° et amenée à 158° par kilog. de houille pure, aussi elles sont loin de pouvoir être recommandées pour les applications industrielles.

Voici encore à titre documentaire, les schémas des dispositions adoptées pour les chaudières à grande production et à faible

[1] Ce navire était monté avec des chaudières Thornycroft.

Digitized by Google

poids par différents constructeurs en Amérique (fig. 158, 159, 160). Elles n'offrent aucune particularité saillante, et il en est de même de la chaudière *Fleming et Ferguson* (fig. 161), qui n'est en substance qu'une chaudière Yarrow avec des tubes courbes.

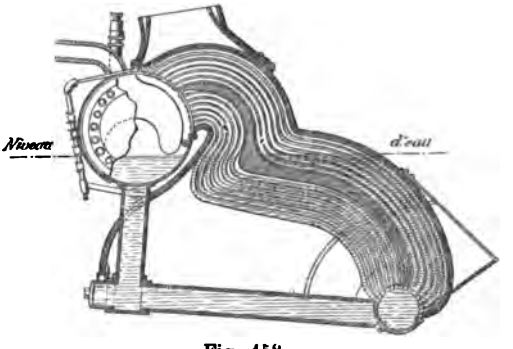


Fig. 158.

La chaudière White (fig. 162) a tout au moins un caractère d'originalité : les tubes sont partie courbés, et partie hélicoïdaux. Les premiers ne servent que comme cloisons directrices des gaz qui traversent les deuxièmes. La grille est placée très bas au-dessous des deux réservoirs d'alimentation, et le plan du niveau d'eau normal passe en dessous du corps supérieur par les faisceaux de tubes. Deux tuyaux de retour à grande

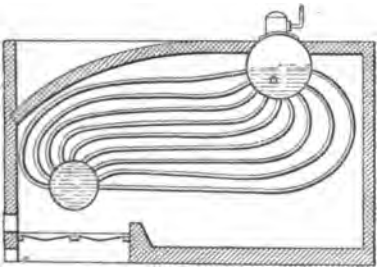


Fig. 159.

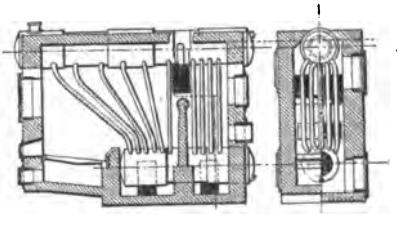


Fig. 160.

section réunissent le corps principal aux deux réservoirs inférieurs d'alimentation. Les flammes vont à l'arrière par la partie centrale du générateur et reviennent à la cheminée par les côtés en deuxième parcours. Il paraît, d'après une communication de M. Milton[1], qu'une chaudière de ce type a été construite et fonctionne régulièrement : le constructeur, par l'organe de son représentant M. Walker, a avoué sa surprise en apprenant ce résultat, attribué par lui aux soins méticuleux qui ont

[1] *Institution of naval Architects.* Session de Printemps, 1894.

Digitized by Google

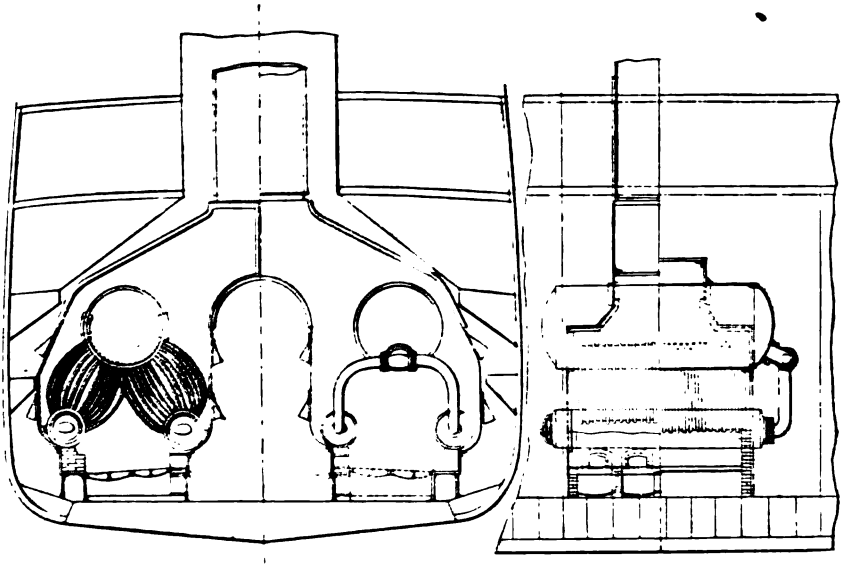


Fig. 161.

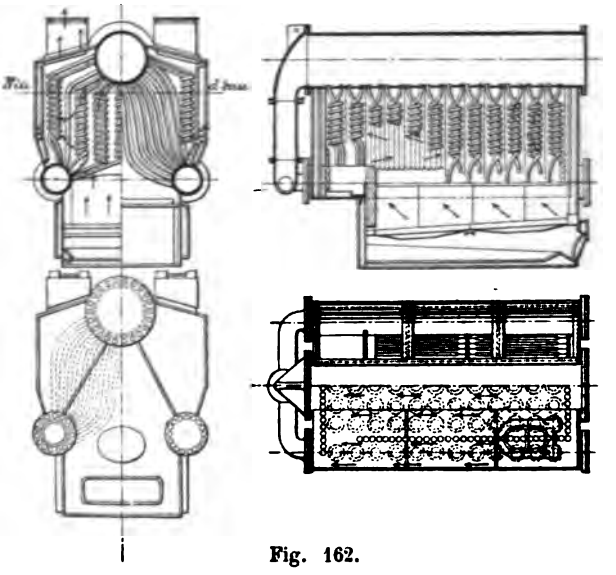


Fig. 162.

présidé au choix des tubes en cuivre dont se composait le générateur.

Digitized by Google

CHAPITRE XVI

CHAUDIÈRES A ÉMULSION DE VAPEUR

L'adaptation de l'émulseur Dubiau paraît devoir apporter des modifications profondes au fonctionnement et à l'établissement des générateurs de vapeur : les résultats des applications industrielles de cet appareil de circulation offrent le plus grand intérêt, aussi allons-nous en examiner quelques applications à différents types de chaudières.

Application à la chaudière n° 37 de l'Association des Propriétaires d'Appareils à vapeur du Sud-Est. — *Description de la chaudière. Type.* — Un bouilleur raccordé à un corps cylindrique horizontal par deux cuissards.

Volume du bouilleur.	2^{m3}	volume total d'eau.	$4^{m3},5$
Volume d'eau dans les corps . .	$2^{m3},5$		
Surface de chauffe du bouilleur.	10^{m2}	surface de chauffe totale.	20^{m2}
— — du corps . .	10^{m2}		
Timbre.	5 kilos.		

Conditions de marche. — La production normale de cette chaudière est, en raison de sa faible longueur, de 15 kilos de vapeur par mètre carré et par heure, soit en totalité 300 kilos.

On peut sans exagération attribuer au bouilleur seul les 2/3 de la vaporisation totale, soit 200 kilos. Ce chiffre porte à $\left(\frac{200}{10}\right) =$ 20 kilos par heure et par mètre carré de surface de chauffe, le régime de production du bouilleur. Son remplacement est le seul mouvement d'eau dans le bouilleur.

L'application de l'émulseur à cette chaudière fut faite dans les conditions suivantes : on ferma par des tôles (fig. 163) l'ouver-

Digitized by Google

ture des deux cuissards dans le bouilleur, et l'on plaça dans celui d'avant un faisceau tubulaire. Au niveau normal, la hauteur de celui-ci avec le plan d'émulsion était de 1m,100. La tôle de fermeture du cuissard arrière portait un tube plongeant jusqu'à la partie basse du bouilleur et faisant l'office de retour d'eau, disposition nécessitée par l'horizontalité du bouilleur afin d'empêcher la vapeur de passer dans le corps cylindrique par le cuissard arrière. Deux manchettes furent placées au débouché des cuissards dans le corps cylindrique pour empêcher l'accumulation des dépôts boueux dans l'ancienne communication.

Enfin la surface de chauffe fut réduite à 13 mètres carrés. Le bouilleur qui primitivement était tout entier plongé dans le premier parcours des gaz fut maçonné sur toute la demi-circonférence supérieure et les voûtes des deuxième et troisième carneaux furent abaissées sur le corps principal.

Le combustible employé était du lignite terreux du département des Bouches-du-Rhône : le chauffeur ordinaire de l'Usine conduisait le feu dans les deux cas. Les essais ont tous eu une durée de 9 heures non interrompue.

Voici les résultats annoncés par M. Dubiau :

	SANS ÉMULSEUR			AVEC ÉMULSEUR	
Surface de grille.	0m²,68			0m²,68	
Surface de chauffe.	20m²			13m²	
Date des essais	12 Juin 1892	14 Juin 1892	25 Juin 1892	31 Décembre 1892	7 Janvier 1893
	kilog.	kilog.	kilog.	kilog.	kilog.
Combustion de lignite brut par heure et par mètre carré de surface de grille. .	82,350	132,350	145,00	78,00	136,00
Proportion des déchets de grilles. . . .	16 0/0	18 0/0	16 0/0	14 0/0	14 0/0
Combustion de lignite pur par heure et par mètre carré de surface de grille. .	69,180	108,530	122,00	66,00	117,00
Combustion de lignite brut par heure et par mètre carré de surface de chauffe.	2.8	4,5	4,95	4,07	7,15
Combustion de lignite pur par heure et par mètre carré de surface de chauffe.	2,35	3,69	4,15	3,46	6,15
Vaporisation ramenée de 0° *à* 158° (5 *kilos de pression*).					
Vaporisation par heure et par mètre carré de surface de chauffe.	10,65	15,20	16,25	17,10	29,00
Rendements { par kilogr. de lignite brut.	3,805	3,376	3,285	4,200	4,063
Rendements { — — pur .	4,530	3,965	3,900	4,940	4,724
Rendements moyens { en charbon brut.	3,489			4,131	
Rendements moyens { en charbon pur .	4,132			4,832	

En examinant le tableau qui précède, on voit que cette chau-

Digitized by Google

dière sans émulseur donnait son meilleur rendement à une allure de 10 litres d'eau vaporisés par mètre carré de surface de chauffe, correspondante à 70 kilos de lignite pur brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille. Dès que cette allure est dépassée la vaporisation par mètre carré augmente, mais le rendement baisse, et avec la quantité maxima de combustible qu'on pouvait brûler par heure et par mètre carré de surface de grille, la vaporisation n'a pu atteindre que 16,25 litres d'eau par heure et par mètre carré de surface de chauffe.

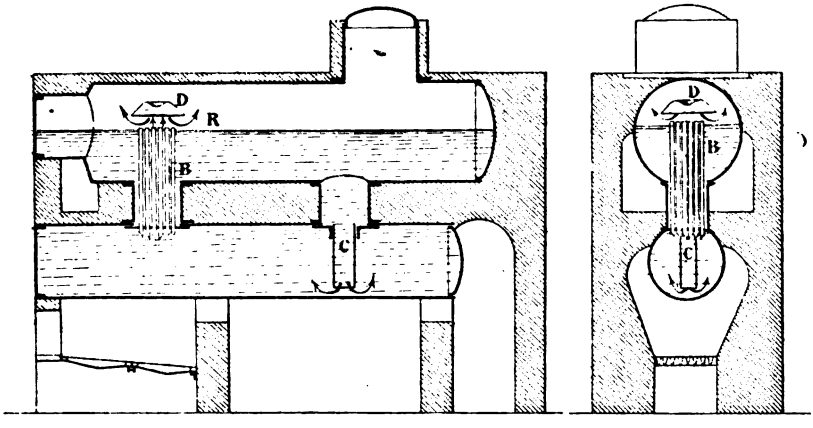


Fig. 163.

Dans cette même chaudière munie de l'émulseur Dubiau, à une allure de foyer de 66 kilos de lignite pur par heure et mètre carré de grille, correspondant au maximum d'utilisation sans émulseur, la puissance de vaporisation a été augmentée de 60 p. 100 et l'utilisation de 9 p. 100.

A l'allure maxima du foyer, 117 kilos de lignite pur par heure et par mètre carré de surface de grille, les augmentations sur la même allure sans émulseur ont été de 78 p. 100 pour la production et de 21 p. 100 pour l'utilisation. En comparant enfin cette dernière allure avec émulseur à l'allure du plus grand rendement sans émulseur, nous voyons que l'augmentation de production a été de 171 p. 100 et de rendement de 4 p. 100.

Ces résultats se passent de tous commentaires.

Une autre constatation de la plus haute importance a été également faite par M. Dubiau à l'occasion de cette première appli-

Digitized by Google

cation : on employait à l'alimentation du générateur des eaux de puits, titrant 92 degrés à l'hydrotimètre : les résidus solides se

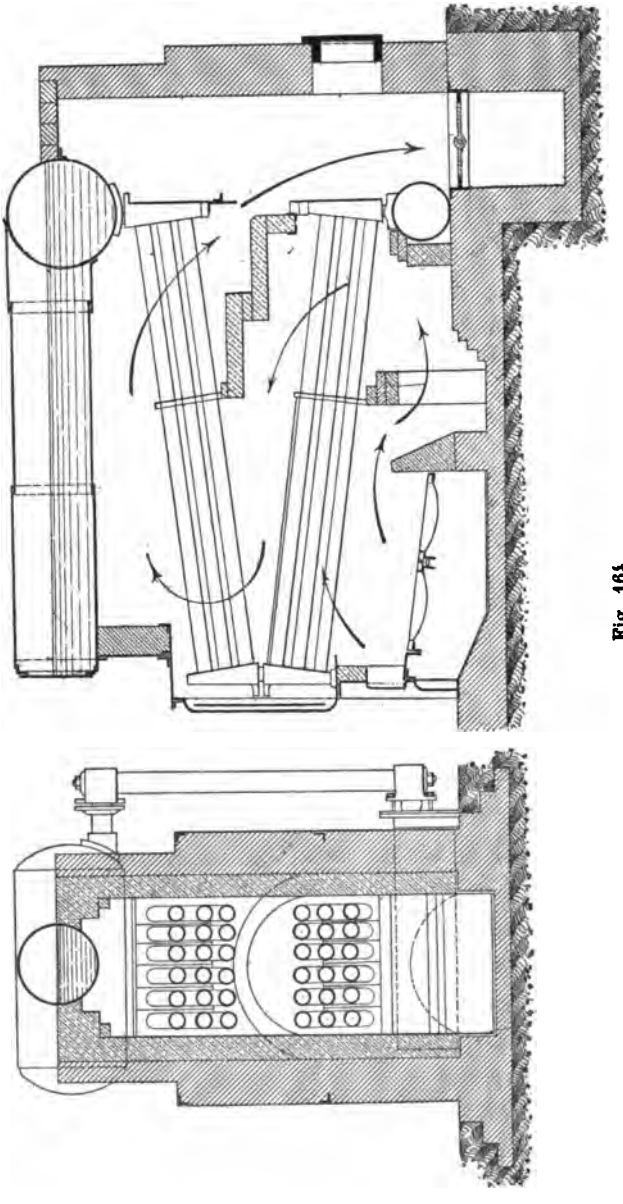


Fig. 164.

composaient de carbonates et sulfates de chaux et de magnésie.

Avant l'application de l'émulseur, la chaudière devait être

Digitized by Google

nettoyée intérieurement tous les deux mois ; le bouilleur était complètement obstrué par les boues après chacune de ces périodes bimensuelles.

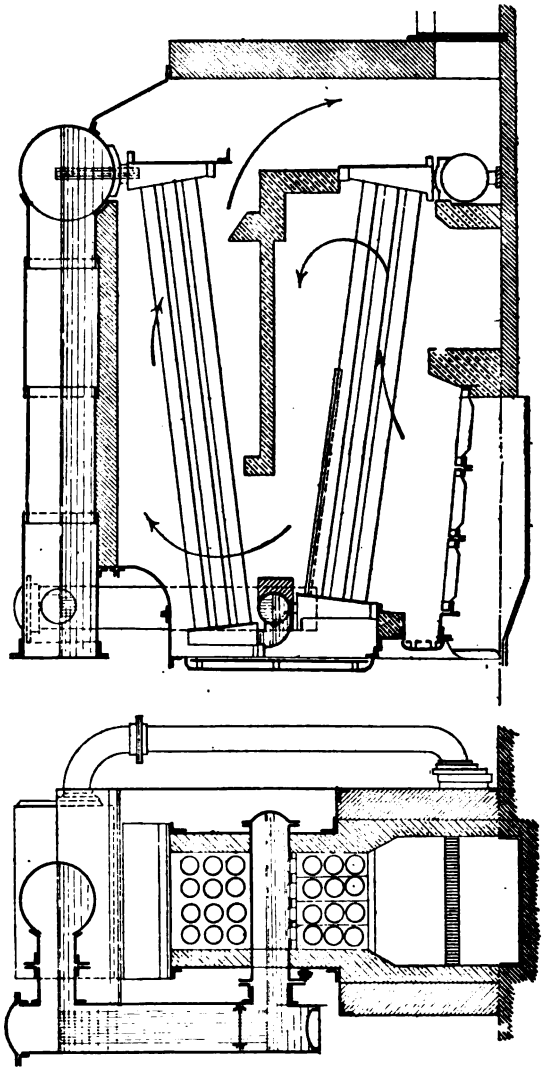


Fig. 163.

Après l'application de l'émulseur, les dépôts boueux ont été ramenés dans le corps cylindrique supérieur où leur présence n'offre plus les inconvénients qu'ils présentent dans le bouilleur.

Application à une chaudière multitubulaire. — La figure 164

Digitized by Google

donne schématiquement les dispositions adoptées pour ce type d'appareil sans émulseurs, et la figure 165 les modifications que nous y avons apportées, en adoptant le fonctionnement avec émulseur.

Ainsi qu'on le voit, la vapeur produite par les tubes des rangées inférieures est émulsée directement dans le corps cylindrique longitudinal avec une partie de l'eau qui les traverse ; l'autre partie, après avoir parcouru le faisceau supérieur, est émulsée avec la vapeur qui s'y dégage par les petits émulseurs placés dans les bagues de communication avec le réservoir transversal. Le gros émulseur produit une charge d'eau de $1^{m},510$ et les petits produisent une charge d'eau de 535 millimètres.

Voici les résultats d'essais obtenus sur la chaudière avec émulseur, installée chez M. Bourgeois, fabricant de couleurs fines, 32, rue du Caire, Paris. Surface de chauffe 22 mètres carrés, sans réchauffeur.

	1 3 avril 1894	2 21 mai 1894	3 31 mai 1894
Durée de l'essai	6 heures.	4 heures.	8 heures.
Eau vaporisée	4 254 kilogr.	4 380 kilogr.	5 873 kilogr.
Température de l'eau d'alimentation.	11°	15°	15°
Pression moyenne de la vapeur.	$7^{k},5$	$6^{k},5$	6 kilos.
Eau vaporisée de 0° à 158° (5 kilos).	4 212 kilogr.	4 296 kilogr.	5 755 kilogr.
Eau à 0° vaporisée à 158° par heure.	702 kilogr.	1 074 kilogr.	719 kilogr.
Charbon brûlé, brut	650 —	650 —	818 —
— — net.	543 —	586 —	791 —
Qualité de la houille	Tout venant d'Aniche.	Briquettes belges grasses.	Briquettes d'Anzin.
Eau à 0° vaporisée à 158° par mètre carré de surface de chauffe et par heure	$31^{k},91$	$48^{k},82$	$32^{k},69$
Rendement en eau à 0° vaporisée à 158° par kilo de houille brute	$6^{k},48$	$6^{k},60$	$6^{k},78$
Rendement en eau à 0° vaporisée à 158° par kilo de houille nette	$7^{k},76$	$7^{k},33$	$7^{k},27$

Les essais n° 1 et 2 ont été faits par le constructeur, en marche continue : l'essai n° 3 a été fait par M. Compère, directeur de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur,

Digitized by Google

en marche normale de l'usine, les feux conduits par le chauffeur de M. Bourgeois ; il comprend 1 heure et quart de marche à feu dormant, de 11 heures à midi et de 4 heures à 4 heures 1/4, pendant les arrêts de l'usine.

Il est ici intéressant de comparer ces résultats entre eux et avec ceux obtenus par M. Walther Meunier, directeur de l'Association alsacienne des propriétaires d'appareils à vapeur, sur différents types de chaudières multitubulaires, et que nous extrayons du tableau annexé au bulletin de cette association, exercice 1892.

Type de la chaudière. . . .	de Naeyer	Roser	Dürr	Babcock-Wilcocx	Belleville	Roots
Pression moyenne	$5^k,45$	$5^k,40$	$6^k,25$	$8^k,80$	$8^k,5$	$8^k,6$
Eau à 0° vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure.	$10^k,70$	$11^k,38$	$12^k,74$	13^k	16^k	$18^k,27$
Eau à 0° vaporisée par kilogramme de houille brute.	$6^k,59$	$4^k,73$	$5^k,51$	$5^k,98$	$5^k,15$	$4^k,53$
Eau à 0° vaporisée par kilogramme de houille nette.	$7^k,55$	$5^k,85$	$6^k,25$	$7^k,24$	$6^k,09$	$4^k,82$

Nous voyons encore ici que l'application de l'émulseur Dubiau aux chaudières multitubulaires, tout en permettant de tripler la production par mètre de surface de chauffe, donne un rendement au moins égal à celui qu'on obtient industriellement de ces générateurs.

L'application d'un réchauffeur sous pression, correspondant à une augmentation de la surface de chauffe pour une grille donnée, permet d'améliorer le rendement dans des proportions notables. C'est ainsi que le même tableau publié par M. Walther Meunier nous donne les résultats suivants :

TYPES	SURFACE DE CHAUFFE		PRESSION	VAPEUR par mètre carré et par heure. Eau à 0°.		RENDEMENT par kilo de charbon. Eau à 0°.		
	Chaudières.	Réchauff.		Chaud.	Ch + Rech.	Brut.	Cendre.	Net.
de Naeyer	316	210	6,90	14,10	8,47	6,79	12,6%	7,76
Babcock-Wilcocx.	346,8	160	7,30	14,50	9,93	6,97	16,23	8,32
—	—	—	8	12,31	8,43	8,08	16,64	9,69
de Naeyer	132	105	6,03	12,70	7,07	7,93	9	8,71

Digitized by Google

Si dans les essais du 31 mai 1894 sur la chaudière de M. Bourgeois, nous supposons un réchauffeur faisant suite à la chaudière et l'alimentant avec de l'eau à la température correspondante à la pression [1], les rendements d'eau à 0° vaporisée par kilogramme de houille brute et nette deviennent respectivement 8k,95 et 9k,62, ou en adoptant l'unité de vaporisation employée en Angleterre et en Amérique, c'est-à-dire le nombre de calories nécessaires pour vaporiser à la pression atmosphérique un kilogramme d'eau à 100°, 10k,99 par kilogramme de houille brute et 11k,73 par kilogramme de houille pure.

Le générateur multitubulaire installé chez M. Bourgeois à Paris ne se prêtait pas à des essais comparatifs avec et sans émulseur.

La Société d'éclairage électrique de Dieppe ayant remplacé une batterie de chaudières multitubulaires du type de la figure 164, par une chaudière à émulsion de vapeur, de la disposition de la figure 165, mais avec une seule rangée de tubes au coup de feu, on a pu y réaliser en service normal de l'usine les essais comparatifs qui suivent :

	AVEC ÉMULSEUR 15 décembre 1894.	SANS ÉMULSEUR 16 décembre 1894.	AVEC ÉMULSEUR 26 janvier 1895.
Durée des essais.	8 h. 20′	8 h. 50′	7 h. 30′
Surface de chauffe.	40 m²	74 m² 8 (96 m² pendant 3 h. : 64 m² pendant 5 h. 50′)	40 m²
Surface de grille.	2 m²	1 m² 85 (2 m² 54 pendant 3 h. : 1 m² 54 pendant 5 h. 50′)	2 m²
Volume d'eau d'alimentation .	8 762 litres	8 700 litres	7 050 litres
Température de l'eau.	9°	9°	9°
Poids d'eau injecté.	8 742k,3	8 680k,5	7 034k,1
Pression moyenne au manomètre.	9 kilos	8k,26	8 kilos
Température correspondante .	179°	175°,8	175°
Poids d'eau à 0° vaporisé à 158°.	8 707k,6	8 632k,7	6 993 kilos
Combustible employé	Cardiff-gaill.	Cardiff-gaill.	Cardiff-tt.-vnt.
Poids total de charbon chargé.	1 240 kilos	1 350 kilos.	970 kilos
Déchets de grille séchés . . .	121 —	91k,4	142 —
Poids du charbon brûlé . . .	1 119 —	1 258k,6	828 —

[1] Dans cet essai la température moyenne des gaz au pied de la cheminée a été de 400°.

Digitized by Google

	AVEC ÉMULSEUR 15 décembre 1894.	SANS ÉMULSEUR 16 décembre 1894.	AVEC ÉMULSEUR 26 janvier 1895.
Température moyenne des gaz, relevée au pyromètre thermo-électrique de Le Châtelier :			
— au foyer	865°	890°	836°
— en quittant les surfaces de chauffe	314°	368°	220°
Charbon brûlé par heure et mètre carré de grille :			
— en forte charge { brut.	106k,2	80 kilos	
— en forte charge { net .	95k,3	74k,2	
— en moyenne charge { brut.	74k,8	82k,6	64k,7
— en moyenne charge { net .	67k,2	77 kilos	55k,2
Charbon brûlé par heure et mètre carré de surface de chauffe :			
— en forte charge { brut.	5k,310	2k,125	
— en forte charge { net .	4k,765	1k,979	
— en moyenne charge { brut.	3k,740	2k,043	3k,233
— en moyenne charge { net .	3k,357	1k,905	2k,760
Volume d'eau d'alimentation vaporisé par mètre carré de surface de chauffe et par heure :			
— en forte charge . .	38 litres	13 lit. 87	
— en moyenne charge.	26 lit. 41	13 lit. 14	23 lit. 5
Poids d'eau à 0° vaporisé à 158° par mètre carré de surface de chauffe et par heure :			
— en forte charge . .	37k,73	13k,80	
— en moyenne charge.	26k,13	13k,07	23k,31

RENDEMENTS

Volume d'eau vaporisé par kilo de charbon brut.	7 lit. 09	6 lit. 44	7 lit. 27
Poids d'eau à 0° vaporisé à 158° par kilo de charbon net . .	7k,78	6k,86	8k,45
Kilowatts-heure produits. . .	241,125 kw.-h.	220 kw.-h.	
Chevaux-heure : $\frac{1\,000\,n}{736 \times 0,80}$	409,5 ch.-h.	373,6 ch.-h.	
Charge horaire maxima :			
— en kilowatts	41,326 kw.-h.	33,751 kw.-h.	
— par mètre carré de surface de chauffe. . .	1,033 kw.	0,352 kw.	
— en chevaux-vapeur . .	70,35 ch.-v.	57,31 ch.-v.	
— par mètre carré de surface de chauffe. . .	1,759 ch.-v.	0,597 ch.-v.	

Digitized by Google

	AVEC ÉMULSEUR 15 décembre 1894.	SANS ÉMULSEUR 16 décembre 1894.
Charge horaire moyenne :		
— en kilowatts	28,946 kw.	24,91 kw.
— par mètre carré de surface de chauffe. .	0,724 kw.	0,333 kw.
— en chevaux-vapeur . .	47,479 ch.-v.	42,361 ch.-v.
— par mètre carré de surface de chauffe . . .	1,187 ch.-v.	0,566 ch.-v.

DÉPENSES (y compris celles de la pompe à vapeur).

En poids de vapeur à 158° :		
— par kilowatt-heure . .	$36^k,527$	$39^k,210$
— par cheval-heure . . .	$21^k,288$	$23^k,080$
En charbon :		
— par kilowatt-heure brut.	$5^k,142$	$6^k,136$
— par kilowatt-heure net .	$4^k,682$	$5^k,721$
— par cheval-heure brut.	$3^k,028$	$3^k,613$
— par cheval-heure net .	$2^k,732$	$3^k,369$

Il ressort des essais des 15 et 16 décembre, qu'avec 40 mètres carrés de surface de chauffe à émulsion de vapeur, on a soutenu l'allure de 70,35 chevaux, alors qu'il a fallu 96 mètres carrés de surface de chauffe des mêmes chaudières sans émulseur pour soutenir l'allure de 57,31 chevaux avec les mêmes machines, c'est-à-dire 140 p. 100 de surface de chauffe additionnelle pour environ 18 p. 100 de travail en moins.

L'utilisation apparente dans le cas de la chaudière à émulsion, malgré une allure deux fois et demie plus forte, a été de 13,4 p. 100 supérieure à celle des chaudières sans émulseur. En vaporisation réelle elle a été beaucoup plus importante, puisque dans le premier cas on a produit le cheval avec 21,288 kilos de vapeur à 158°, alors que le chiffre correspondant de la journée du 16 décembre, 23,080 kilos, donne approximativement par différence la valeur des entraînements d'eau : nous disons approximativement, car les moteurs de la station électrique de Dieppe travaillant en surcharge, le poids de vapeur sèche nécessaire pour produire le cheval dans les essais du 16 était inférieur à celui consommé le 15, jour où la surcharge était plus importante.

La meilleure utilisation et la suppression des entraînements d'eau font qu'avec l'émulseur on a réalisé une économie d'environ 20 p. 100 sur la consommation du combustible.

Digitized by Google

Les parcours des gaz dans la chaudière à émulseur n'étaient pas disposés comme dans celles sans émulseur (fig. 164). Les autorités sont d'accord pour dire que le maximum de transport de chaleur a lieu lorsque les gaz frappent normalement les surfaces de chauffe : ce principe est surtout appliqué dans toutes les chaudières multitubulaires, qui se prêtent plus particulièrement à ce genre de chauffage. Celui-ci est même invoqué par leurs constructeurs comme un avantage incontesté de ce type d'appareils à vapeur pour une meilleure utilisation du combustible.

Par application de ce qui précède, lors des essais du 15 décembre, les parcours des gaz de la chaudière avec émulseur de vapeur avaient été disposés comme aux figures 102, 105 et 106. Dans ces conditions, il aurait été permis de conclure que le meilleur rendement obtenu avec cet appareil sur celui des mêmes chaudières sans émulseur, mais avec parcours de gaz parallèle aux tubes, n'était dû qu'à ces différences de chauffage.

Afin de nous en assurer, nous avons fait modifier les parcours des gaz comme à la figure 165, et avons réalisé avec cette nouvelle disposition de carneaux, semblable à celle des générateurs sans émulsion de vapeur, les essais de rendement du 26 janvier 1895. Il suffira de comparer les résultats obtenus pour reconnaître la supériorité du chauffage par courants parallèles, sur celui à direction normale aux surfaces de chauffe, ainsi que nous l'avions du resté énoncé page 287.

Les résultats des visites intérieures dans les différentes installations de ce type de générateur multitubulaire à émulsion de vapeur ont prouvé que la circulation forcée de l'eau combattait très efficacement la formation des incrustations : la plus grande partie des dépôts est précipitée à l'état boueux, et s'amasse dans le collecteur de boues et dans le corps cylindrique transversal, loin des surfaces chauffées ; les tubes de coup de feu, malgré les grandes vaporisations de ces appareils, sont propres, aussi droits qu'au montage et sans aucune trace de surchauffe.

Ces visites intérieures ont encore révélé un fait extrêmement intéressant : c'est que partout où il y a espace de vapeur, et dans le cas de ces chaudières les parois de ces espaces ne sont pas chauffées, il y a formation de dépôts durs adhérents ; ce qui permet

Digitized by Google

de croire qu'il n'y a cristallisation des sulfates et adhérence que là où le métal est mis à sec. Quant aux tubes qui composent l'émulseur de vapeur, dont le faible diamètre aurait pu faire craindre l'obstruction, ceux-ci après six mois de fonctionnement sans nettoyage, sont tapissés d'une mince couche de dépôts, d'une épaisseur moindre que celle d'une coquille d'œuf.

Application à une chaudière à bouilleurs de la Compagnie des Eaux-Vannes. — L'usine de la Compagnie des Eaux-Vannes, à Baslieux, près Reims, possède quatre générateurs, actionnant trois machines élévatoires.

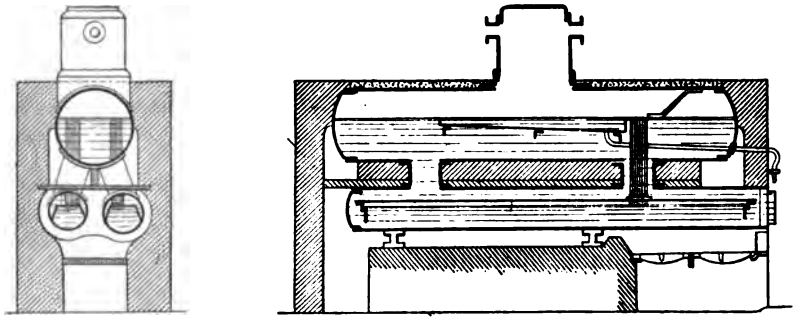


Fig. 166.

Une chaudière semi-tubulaire de 80 mètres carrés de surface de chauffe. Trois chaudières à bouilleurs de chacune 26 mètres carrés de surface de chauffe.

L'émulseur a été appliqué à une de ces chaudières à bouilleurs.

La figure 166 donne les dispositions que nous avons adoptées pour cette application : le niveau d'émulsion se produit dans une cloche qui est mise en communication avec l'espace de vapeur par 2 faisceaux déterminant au niveau normal une distance entre les deux plans de niveau de $1^m,088$; cette disposition par cloche intérieure a l'avantage d'utiliser à la chauffe toute la surface du bouilleur. La grille a été augmentée et l'allure du foyer doublée.

La Compagnie des Eaux-Vannes a réalisé en août et septembre 1894 deux séries d'essais en service normal, pendant une semaine pour chaque essai.

Digitized by Google

Dans la première série, du 13 au 18 août, on a fonctionné avec la chaudière semi-tubulaire et la chaudière à bouilleurs munie de l'émulseur, soit ensemble 106 mètres carrés de surface de chauffe, dont un quart seulement, 26 mètres carrés, avec émulsion de vapeur.

Les résultals en travail ont été :

Nombre de chevaux en eau montée	19 915 520,95
Nombre de chevaux-heure en eau montée	5 530,54
Charbon brûlé pendant la semaine	10 230 kil.
Charbon brûlé par cheval-heure en eau montée. .	1^k,851

Dans la deuxième série d'essais, du 31 août au 5 septembre, on a fonctionné avec la même chaudière semi-tubulaire et les deux autres chaudières à bouilleurs, soit ensemble 132 mètres carrés de surface de chauffe.

Les résultats en travail ont été :

Nombre de chevaux en eau montée	16 230 107,52
Nombre de chevaux-heure en eau montée . . .	4 508,35
Charbon brûlé pendant la semaine	8 433 kil.
Charbon brûlé par cheval-heure en eau montée. .	1^k,870

Les feux dans les deux cas ont été conduits de façon à maintenir la pression constante pendant la durée du fonctionnement simultané des trois machines.

Pour pouvoir comparer et conclure sur les résultats obtenus, il ne faut comparer que le travail produit pendant que les trois moteurs fonctionnaient ensemble, et qui est le suivant :

Essai avec 106 mètres carrés de surface de chauffe dont 26 à émulsion.

Durée du fonctionnement	46 h. 1/2
Chevaux-heure en eau montée	5 014,54

Essai avec 132 mètres carrés de surface de chauffe.

Durée du fonctionnement	46 h. 1/2
Chevaux-heure en eau montée	4 169,57

Ce dernier chiffre rapporté au mètre carré de surface de chauffe des chaudières en service donne 0,679 cheval en eau montée par mètre carré de surface de chauffe et par heure.

La chaudière semi-tubulaire à bouilleurs a fonctionné à la même

Digitized by Google

allure dans les deux cas; sa production dans la première série d'essais a été donc de

$$0,679 \times 80 \times 46,5 :: 2\,525,88 \text{ chevaux-heure.}$$

Le travail obtenu de la chaudière à émulsion de 26 mètres carrés a été de 5 014,54 — 2 525,88 = 2 488,60 chevaux-heure en eau montée, c'est-à-dire 2,057 chevaux-heure par mètre carré de surface de chauffe : trois fois la puissance des chaudières identiques sans émulseur.

La moitié environ du travail total a été obtenue du quart seulement de la surface de chauffe totale.

Malgré cet accroissement considérable dans la production de vapeur, la consommation de charbon par cheval-heure en eau montée a été plus faible; cette différence est minime, mais il y a lieu de tenir compte qu'avec la chaudière à émulsion, les machines refoulaient à $22^m,60$ et à 30 mètres de hauteur, et, à cause de la plus grande admission, ont consommé un plus grand poids de vapeur par cheval-heure que dans le cas des essais sans chaudière à émulsion, où elles n'ont refoulé qu'à $20^m,60$ et à 24 mètres.

Aux visites intérieures de la chaudière à émulsion on a constaté que tous les dépôts étaient à l'état boueux, et que après dix mois de fonctionnement les tôles de coup de feu ne portaient aucune trace de surchauffe, ni les assemblages de fatigue.

Application à une chaudière semi-tubulaire. — La figure 167 donne le schéma d'ensemble de cet appareil d'essai, établi à Paris par la Société universelle des émulseurs de vapeur : la production du bouilleur est émulsée dans le corps supérieur par un cylindre extérieur renfermant le faisceau de tubes émulseurs, la distance normale entre les plans de niveaux étant de $1^m,300$.

Cette chaudière peut fonctionner avec ou sans émulseur; pour réaliser ce dernier cas on n'a qu'à supprimer le cylindre extérieur qui contient cet appareil et la cloche intérieure, et fermer les ouvertures de communication sur le générateur par des joints pleins.

M. Ey. Schmitz, ancien ingénieur des usines de la Compagnie

Digitized by Google

parisienne du gaz, a réalisé sur cette chaudière une série d'essais comparatifs dont voici les résultats :

CHAUDIÈRE SEMI-TUBULAIRE A UN BOUILLEUR DE 20$^{m^2}$,98 DE SURFACE DE CHAUFFE

	AVEC ÉMULSEUR			SANS ÉMULSEUR		
Dates des expériences	10 oct. 1894	11 oct. 1894	12 oct. 1894	18 oct. 1894	19 oct. 1894	20 oct. 1894
Eau vaporisée par heure et par mètre carré de surface de chauffe	34^k,523	34^k,041	19^k,255	18^k,750	10^k,767	17^k,964
Moyennes	. . . .	29^k,273	. . . . .	. . . . .	15^k,827	
Surface de grille. .	0$^{m^2}$,96	0$^{m^2}$,96	0$^{m^2}$,96	0$^{m^2}$,48	0$^{m^2}$,48	0$^{m^2}$,48
Combustible	Coke de gaz.	Briquettes d'Anzin.	Grain lavé d'Aniche.	Grain lavé d'Aniche.	Grain lavé d'Aniche.	Coke de gaz.
Combustible pur brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.	4^k,791	4^k,583	2^k,517	2^k,806	1^k,577	2^k,589
Moyennes	. . . .	3^k,962	. . . . .	. . . . .	2^k,324	
Combustible chargé par heure et par mètre carré de surface de grille.	114^k,583	105^k,729	62^k,500	138^k	80^k	63^k
Moyennes	. . . .	94^k,270	. . . . .	. . . . .	93^k,66	
Volume d'eau vaporisé par kilo de combustible brut.	6^l,651	7^l,108	6^l,802	6^l,354	6^l,278	6^l,659
Moyennes	. . . .	6^l,854	. . . . .	. . . . .	6^l,430	
Poids d'eau à 0° vaporisé par kilo de combustible pur.	7^k,204	7^k,427	7^k,617	6^k,680	6^k,826	6^k,937
Moyennes	. . . .	7^k,426	. . . . .	. . . . .	6^k,814	

Nous retrouvons dans le résumé de ces essais les mêmes résultats que dans ceux des autres applications : il est superflu de nous répéter en faisant l'analyse.

Au point de vue des incrustations, cette installation a pleinement confirmé les observations relevées sur les autres chaudières à émulsion de vapeur.

L'eau d'alimentation titre 22,5°.

Après fonctionnement d'une semaine avec émulseur, à une allure de 34 litres d'eau vaporisés par mètre carré de surface de

Digitized by Google

chauffe et par heure, on a trouvé tous les sels précipités à l'état boueux, accumulés pour la plus grande partie dans l'auge de décantation qui déverse dans le corps principal l'eau élevée par l'émulseur.

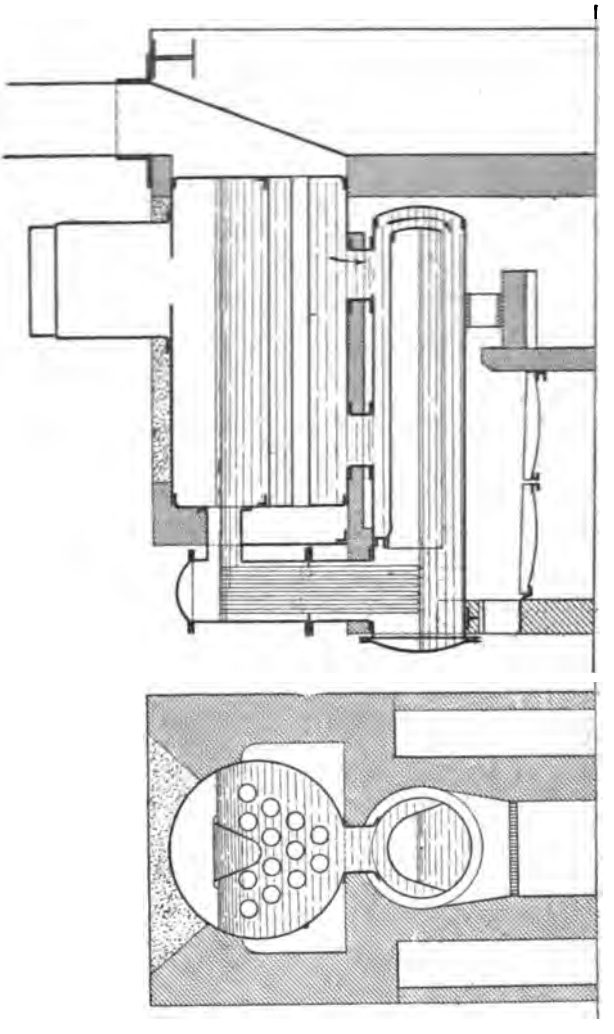


Fig. 167.

Les sels en suspension dans la masse liquide du bouilleur étaient déposés contre les parois, qu'un simple brossage mettait à nu.

Au contraire, après huit heures seulement de fonctionnement sans émulseur, à une allure de 15 litres d'eau vaporisés par

Digitized by Google

mètre carré de surface de chauffe, et avec la même eau d'alimentation, les parois de coup de feu du bouilleur étaient revêtues d'une couche de dépôts durs adhérents qui ne se détachait qu'après un grattage énergique.

Le cadre de ce livre ne nous permet pas de continuer les énumérations des résultats obtenus par l'application de l'émulseur Dubiau aux différents types de chaudières; on en trouvera de nombreux résumés analytiques complets dans la brochure éditée par les soins de la Société Universelle des émulseurs de vapeur. Ceux qui précèdent sont amplement suffisants pour montrer les avantages énormes que l'on peut tirer de cet appareil, dont la simplicité de conception nous amène naturellement à une comparaison avec l'œuf de Christophe Colomb.

Digitized by Google

CHAPITRE XVII

ACCIDENTS ET EXPLOSIONS

Causes originelles des accidents. — Le fonctionnement des générateurs de vapeur peut toujours devenir dangereux, d'un instant à l'autre, pour des causes non apparentes, mettant ainsi en danger la vie des personnes qui se trouvent à proximité et pouvant parfois occasionner des dégâts matériels considérables.

Les explosions de chaudières à vapeur se produisent toujours à des moments de sécurité apparente la plus complète, sans signes précurseurs, et avec une rapidité telle, qu'il est même impossible au personnel de service de sauver leur vie lorsqu'elle est menacée.

Les accidents proprement dits sont des détériorations ou déformations partielles accompagnées parfois de la déchirure d'une des parties de la chaudière, mais sans que la réaction qui s'ensuit produise la destruction du générateur. Malheureusement même les accidents sont trop souvent mortels pour le personnel de service.

La préoccupation constante des ingénieurs a été en tout temps d'empêcher et de prévenir le retour de ces catastrophes, dont les causes paraissaient problématiques : on a eu recours pour les expliquer à des hypothèses parfois très bizarres.

Il est évident qu'un accident de chaudière ne peut se produire que si la pression intérieure atteint la limite de la charge de rupture du métal : c'est donc uniquement sur les causes qui peuvent abaisser cette limite qu'il faut diriger toute étude relative aux accidents et aux explosions.

En général, dans l'étude d'un générateur de vapeur, on adopte

Digitized by Google

comme coefficient de sécurité un rapport de 1/6 à 1/8 entre la charge qui correspond à la pression de fonctionnement et celle qui produirait la rupture des matériaux employés. Mais, comme on le voit, tout dépend et de la valeur des formules qui servent à calculer les efforts et de l'homogénéité des matériaux employés; c'est ainsi que le coefficient de sécurité qu'on s'était imposé se trouve parfois bien loin d'être réalisé; en outre l'élasticité du métal peut parfois renvoyer les efforts sur d'autres parties que celles en études. Pour pouvoir bien déterminer la cause d'une déchirure dans un générateur de vapeur, il ne suffit pas de rechercher le point le plus faible et la mesure de l'effort capable de provoquer la rupture, mais il faut étudier soigneusement les déformations élastiques qui ont pu se produire avant que cette pression ne fût atteinte.

Les causes qui peuvent occasionner un défaut de résistance dans les parties des générateurs de vapeur sont nombreuses; elles peuvent toutefois être classées comme suit :

Vice de matière ou de construction.

Détériorations dues à l'usure normale ou anormale.

Rupture d'équilibre de la masse d'eau.

Toutes peuvent donner lieu à un accident, à la pression normale de fonctionnement et même à une pression inférieure.

A ces causes il faut ajouter celle qui résulte d'une surpression ou accroissement anormal de la pression de fonctionnement.

Accroissements de pression. — Nous examinerons d'abord dans quelles limites le chauffeur est responsable d'un accroissement de pression accidentel. Ici se pose une question : quel est l'accroissement constant de pression qui se produit dans une chaudière si la production de vapeur est constante et si la vapeur produite n'a pas d'issue, et jusqu'à quel point l'industriel et le chauffeur peuvent se fier aux soupapes de sûreté placées règlementairement sur les générateurs pour empêcher cet accroissement de pression.

Dans l'ouvrage de Zeuner sur la théorie mécanique et la chaleur nous trouvons la formule théorique des accroissements de pression.

Digitized by Google

Si nous désignons par T le temps en minutes qui doit s'écouler entre le moment où toute sortie de vapeur est supprimée et celui ou la pression atteint une limite dangereuse ;

Par P le poids d'eau en kilogrammes contenu dans la chaudière ;

Par t' la température à laquelle la force élastique de la vapeur correspond à la pression dangereuse ;

Par Q le nombre de calories absorbées par l'eau par minute ; la relation

$$T = \frac{P(t' - t)}{Q}$$

nous donnera avec une approximation suffisante, le temps nécessaire pour que la pression atteigne la limite dangereuse.

Si nous supposons une chaudière contenant 500 litres d'eau ayant une surface de chauffe de 10 mètres carrés et vaporisant 18 kilogrammes d'eau à 0° par mètre carré et par heure, fonctionnant à 5 kilos et pour laquelle la pression dangereuse serait de 15 kilos, la formule nous donne :

$$T = \frac{500 \times (200 - 158)}{1964} = 10',7$$

Si la pression de fonctionnement était de 8 kilos la formule donnerait

$$T = \frac{500 \times (200 - 175)}{1980} = 6',3$$

Si le volume d'eau n'était que de 200 litres nous obtiendrions

$$T = \frac{200 \times (200 - 175)}{1980} = 2',5$$

Et enfin si la puissance de vaporisation était de 36 litres d'eau à 0° par mètre carré et par heure la pression dangereuse serait atteinte en

$$T = \frac{200 \times (200 - 175)}{3960} = 1',25$$

Nous voyons de ce qui précède que les accroissements de pression seront moins rapides dans les chaudières qui contiennent un grand volume d'eau et qui marchent à des allures modérées que

Digitized by Google

dans celles ayant un faible volume d'eau et à grande production, telles que les chaudières de locomotive et les générateurs de marine à tubes d'eau. Pour un même accroissement de pression, le temps ira toujours en diminuant avec l'élévation des pressions puisque l'écart des températures diminue.

L'abaissement du plan de niveau d'eau dans les générateurs augmente donc les dangers d'accidents, non seulement en permettant la surchauffe des parois, mais en facilitant aussi les accroissements de pression pour une même allure du foyer.

Soupapes de sûreté. — Les soupapes automatiques, dites de sûreté, que l'on place réglementairement sur toutes les chaudières, ont été construites pour empêcher ces augmentations de pression intérieure, et l'on a généralement admis qu'elles sont efficaces si elles sont bien calculées et si elles sont entretenues en parfait état de fonctionnement. De cette erreur, généralement acceptée par nombre d'ingénieurs et surtout par les industriels et les chauffeurs, il en résulte que certaines explosions, dont la cause échappe à des investigations souvent superficielles, sont attribuées aux calages des soupapes de sûreté ou au mauvais fonctionnement des organes mobiles qui les composent.

Comme la soupape de sûreté est dans le cas de surpression, le seul appareil sur lequel on compte pour corriger l'inattention ou l'incompétence du chauffeur, il est important pour celui-ci d'en connaître le fonctionnement ; nous devons ajouter que les chauffeurs intelligents ne se fient nullement aux soupapes de sûreté pour maintenir la pression limite, mais emploient de préférence les autres moyens qu'ils possèdent pour régler la production de vapeur, tels que l'allure du feu, l'ouverture des portes de foyer ou de nettoyage des faisceaux tubulaires, et que la sécurité dans l'emploi d'une chaudière à vapeur est due à leur savoir faire et à leur intelligente attention plutôt qu'à l'appareil imaginé pour régler la pression.

Les différents modèles de soupapes de sûreté à échappement progressif, que plusieurs constructeurs établissent depuis quelques années, évitent théoriquement les principaux reproches qu'on adressait aux soupapes simples ; mais en pratique, elles pré-

Digitized by Google

sentent toujours des inconvénients d'autant plus fréquents que leur construction est plus compliquée.

En résumé, les soupapes de sûreté, simples ou à échappement progressif, n'offrent aucune garantie contre la surpression ; elles ne doivent être considérées que comme des appareils contrôlant les indications des manomètres et soumis à une surveillance et un entretien continus ; dans ces conditions, la préférence doit être donnée aux soupapes simples, le chauffeur ayant à sa portée des moyens plus efficaces et plus certains pour régler la production de la vapeur.

Il est ici intéressant de rapprocher de ce qui précède l'article 6 du décret du 30 avril 1880 sur les appareils à vapeur.

« Chaque chaudière est munie de deux soupapes de sûreté chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire.

« L'orifice de chacune des soupapes doit suffire à maintenir, celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée et quelle que soit l'activité du feu, la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède, pour aucun cas, la limite ci-dessus. »

On ne saurait plus officiellement reconnaître que les soupapes de sûreté ne répondent pas au but pour lequel on les impose : un simple robinet à portée du chauffeur et un tuyau de décharge de vapeur lui donneraient une plus grande facilité pour donner issue à la vapeur. Cette manœuvre ne présente pas le danger du déchargement d'une soupape, sauf pour les cas adoptés par la Marine, qui donne au chauffeur le moyen de décharger les soupapes à distance par l'intermédiaire d'un levier manœuvré par une vis.

Efforts dus aux inégalités de dilatation. — Parmi les causes qui contribuent à la diminution de résistance des parties dont se compose un générateur de vapeur, les efforts dus à la dilatation inégale de ces parties sont des plus importants, car ils sont parfois permanents et parfois alternatifs, et dans tous les cas se produisent lors de chaque mise en pression et se répètent pour chaque changement d'allure.

Digitized by Google

La dilatation linéaire moyenne du fer est, d'après Dulong et Petit, de :

0,0000118 par degré entre 0 et 100°.
0,0000147 par degré entre 0 et 300°.

Ainsi une barre de fer de 1 centimètre carré de section et de 1 mètre de longueur, portée de 0° à 100° s'allonge de 1,18 millimètres. Pour empêcher cet allongement, il faudrait exercer un effort équivalent à la pression de plus de 2 000 kilogrammes ; on voit ainsi la poussée considérable qui est développée par la dilatation ou la contraction d'une barre métallique ; cet effort de contraction a été utilisé à Paris, au Conservatoire des Arts et Métiers, pour s'opposer à la poussée d'une voûte qui avait écarté de la verticale les murs sur lesquels elle s'appuyait.

Dans un générateur de vapeur, ces efforts prennent des valeurs énormes, et nous allons en calculer un exemple qui les mettra en relief.

M. J. Auscher, ingénieur des Constructions Navales, a fait, en novembre 1891, une communication à l'Association Technique Maritime sur la « Répartition des Températures dans les Chaudières à vapeur » dont l'introduction nous donne des indications utiles pour poser les bases du calcul que nous allons établir.

Dans son étude, qui date du milieu de l'année 1890, M. Auscher, attribue la plupart des mécomptes que donnent les chaudières marines du type ordinaire à retour de flamme, aux écarts de température que subissent leurs diverses parties pendant la mise en pression et pendant les premières heures de chauffe.

Ce n'est en effet qu'au bout d'un temps plus ou moins long que l'écart entre les températures des parties supérieure et inférieure devient nul ou du moins très faible.

Il cite comme exemple : 1° les chaudières à trois foyers du *Jean-Bart*, sur lesquelles on a constaté, dans un essai à chaud fait avant leur embarquement, que la partie inférieure reste froide pendant toute la mise en pression et ne se réchauffe qu'au bout de cinq ou six heures. La zone de séparation des parties chaude et froide est nettement accusée : elle se trouve à la hauteur des grilles des foyers latéraux et a environ 10 centimètres de largeur ;

Digitized by Google

2° les chaudières du type *Amirauté*, à deux et à trois foyers, du *Davout*, du *Neptune*, etc., où l'on a relevé, après cinq heures de chauffe, 185° à la partie haute et 60° seulement à la partie basse, avec une zone étroite de séparation brusque au niveau des grilles.

C'est surtout l'existence de cette zone intermédiaire, séparant nettement une région uniformément chaude d'une autre complètement froide, qui cause les efforts anormaux constatés sur ces chaudières, et révélés par des fuites plus ou moins graves dès les premières chauffes.

Prenons maintenant la chaudière d'expérience sur laquelle M. Fletcher a relevé les observations qui sont transcrites aux pages 191 et suivantes, et dont nous donnons plus loin, page 348 et suivantes la description détaillée. Cette chaudière a un diamètre de $2^m,133$: l'épaisseur de la tôle est de 11,1 millimètres ; la surface de la section du corps cylindrique est donc de 744 centimètres carrés. Le plan des grilles donne, pour la partie inférieure de la chaudière, une flèche de 900 millimètres environ, et en la diminuant de 100 millimètres nous aurons comme surface de la partie du corps cylindrique à basse température 325 centimètres carrés. La moyenne des différences de température relevées depuis le moment où les soupapes de sûreté commencent à souffler est de 106° C. La chaudière ayant une longueur de $8^m,457$, la différence d'allongement théorique entre la partie au-dessus du plan des grilles et celle au-dessous était de $8^m,457 \times 0,0000147 \times 106 = 13,17$ millimètres, c'est-à-dire 1/642e de la longueur, ce qui correspond à un effort exercé sur la partie basse de 1 000 tonnes en chiffres ronds, plus de 3 000 kilogrammes par centimètre carré. Dans les mesures relevées expérimentalement par M. Fletcher, l'allongement du corps cylindrique à la partie supérieure n'a été que de 9,5 millimètres, car, sous l'effort exercé par la partie inférieure qui s'oppose à cet allongement, l'élasticité du métal fait qu'il y a une certaine compression.

A cet effort colossal, auquel sont soumis les assemblages des viroles, vient s'ajouter celui dû à la dilatation du foyer, et il est utile ici de remarquer que la partie basse de la chaudière en question était chauffée par des gaz de retour. L'importance de ces tractions augmente considérablement lorsque, comme dans les

Digitized by Google

chaudières marines et les chaudières à foyer intérieur amovible de machine demi-fixe ou locomobile, la partie inférieure du générateur n'est pas chauffée extérieurement par les produits de la combustion. L'alimentation à l'eau froide et le fonctionnement à hautes pressions placent à ce point de vue ces appareils dans les conditions les plus dangereuses pour leur résistance aux pressions intérieures. C'est ainsi que de nombreuses chaudières de cuirassés ont dû être mises hors service après quelques mois seulement d'usage, malgré une construction reconnue irréprochable et l'emploi de matériaux de tout premier choix.

On ne s'étonnera plus, dans ces conditions, des nombreuses explosions meurtrières qui se produisent au moment de la reprise du service après chômage et que l'on a presque toujours imputées au manque de sobriété des chauffeurs, le plus souvent victimes du devoir et des défauts organiques des appareils dont on leur confie la conduite.

Ces efforts, dus aux inégalités de dilatation, se produisent également dans les chaudières de locomotives, et M. Rondelet vient de publier, dans la *Revue générale des chemins de fer*, le résultat d'expériences faites sur un générateur de ce type, dans le but de relever directement les mouvements du foyer et de son enveloppe. A la mise en feu la chaudière était remplie d'eau froide, et les mesures prises de cinq en cinq minutes jusqu'à ce que la pression montât à 1 kilogramme : à partir de ce moment elles étaient prises à chaque accroissement de pression de 1 kilogramme jusqu'à la tension normale de fonctionnement, 11 kilogrammes. Les résultats montrent, ainsi que cela était facile à prévoir, qu'à l'allumage la boîte à feu intérieure se dilatait beaucoup plus rapidement que l'enveloppe. L'allongement maximum du foyer dans le sens vertical a été de 2,5 millimètres et s'est réalisé avec une pression de 1 kilogramme quarante-cinq minutes après la mise en feu ; ensuite le mouvement de dilatation de l'enveloppe s'est accentué, et à la pression de 9 kilogrammes la différence était nulle. L'effort des différences de dilatation est supporté dans ces chaudières par les entretoises qui retiennent le foyer à l'enveloppe, et ce qui précède explique la rupture fréquente de ces entretoises, qui ne sont calculées que pour s'opposer aux

Digitized by Google

déformations des parois planes qu'elles relient sous l'effort de la pression intérieure. Malgré ces conducteurs métalliques, la présence de l'eau sur les côtés du foyer empêche la transmission de la chaleur à l'enveloppe, et ce n'est que lorsque toute la lame d'eau a été amenée à la température qui correspond à la pression de fonctionnement que la différence de dilatation est annulée ; en service, la lame d'eau disparaissant, comme nous l'avons vu page 222, les différences de dilatation sont insignifiantes et les entretoises ne travaillent plus que normalement ; mais à la partie basse du foyer et de son enveloppe, en dessous du plan de la grille, les efforts dus à une différence de dilatation dans le sens horizontal sont considérables : c'est encore dans cette partie que se manifestent les fuites aux assemblages.

Effets des dilatations et contractions alternées. — L'effet des dilatations et contractions successives du métal à chaque période de repos des chaudières a encore une influence très marquée sur les tôles, qui sont de ce chef soumises à une nouvelle cause de diminution de résistance.

M. E. Wehrenfennig a publié en 1884 (*Organ fur die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, vol. XXI), les résultats d'expériences très intéressantes qu'il avait entreprises pour étudier les effets de changements de températures successifs et continus. Les limites entre lesquelles il a opéré sont : la température de l'ébullition normale de l'eau et celle du rouge clair. Il ressort de cette communication que les effets d'échauffements et de refroidissements successifs sont constants, qu'ils se reproduisent en répétant les expériences et qu'ils augmentent avec la durée de la période d'échauffement et l'élévation de la température.

Ainsi les tôles ou les barres de fer, portées une seule fois au rouge, se sont raccourcies après refroidissement, mais augmentent en épaisseur, de environ 1/20 à 1/10 p. 100.

La fonte de fer et le cuivre au contraire s'allongent et s'amincissent, l'une de 1/20 p. 100 et l'autre de 1/5 p. 100. Ces derniers résultats ne concordent pas avec ceux publiés en 1863 par M. H. Caron (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. LVI), car là le refroidissement était brusque, tandis que dans

Digitized by Google

les expériences de M. E. Wehrenfennig le refroidissement est lent.

Ces derniers essais expliquent pourquoi les fuites de certaines garnitures exposées à la chaleur s'étanchent après une courte période de service ; pourquoi on ne peut dévisser un écrou en fer placé sur une entretoise en cuivre alors que cela est possible pour des écrous en bronze ; pourquoi les pailles se gercent sur la face exposée au feu, où elles sont soumises à de plus grands écarts de température ; pourquoi les trous de rivets se gercent sur les tôles de foyer en fer ou en acier, tandis que ce phénomène ne se produit pas dans les tôles de cuivre.

Dans les chaudières à foyer intérieur, on remarque généralement au dérivetage des joints transversaux que les trous de rivets se chevauchent quoique ayant été percés en place à la mèche et sur les deux tôles en une seule fois ; si on les réalèse, et qu'on procède à un nouveau rivetage, ils chevauchent de nouveau après un temps très court.

A l'appui de ce qui précède on pourra consulter le catalogue de l'intéressante Exposition collective des Associations françaises des Propriétaires d'appareils à vapeur en 1889. Parmi les différents exemples nous signalerons les numéros 7, 8, 47, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 73.

Effets de la surchauffe des plaques tubulaires. — Lorsque les tôles sont planes et que leur épaisseur est relativement importante, comme dans les plaques tubulaires des foyers intérieurs ou des chambres de combustion, la différence de température entre les deux faces, qui correspond à une différence d'allongement, tend à rendre la plaque convexe vers la partie chauffée et ainsi à l'arracher des tubes. M. A. F. Yarrow (*Transactions of the Institute of Naval Architects*, vol. XXXII, 1881) a réalisé des expériences qui le confirment. Cette déformation est accentuée par la présence de corps étrangers sur la face intérieure et par les matelas de vapeur.

Prenons par exemple une plaque tubulaire de 15 millimètres d'épaisseur dans laquelle est inséré un tube de 2 millimètres d'épaisseur, parfaitement net, et supposons qu'ils transmettent

Digitized by Google

une quantité de chaleur pouvant vaporiser 100 litres d'eau à l'heure par mètre carré de surface de chauffe. En adoptant les chiffres de M. Hirsch[1] l'excès de température entre les faces chauffées et mouillées sera de 100° pour la plaque; pour le tube il ne sera que de 15°, et la différence entre les températures moyennes de la plaque et du tube sera de 42°5, ce qui, pour un trou de 75 millimètres dans la plaque, correspond à un agrandissement de 4/100 de millimètres, différence qui est compensée par la compression qui existe dans la partie mandrinée du tube à la suite de cette opération. Mais si nous supposons que la face mouillée de la tôle soit en contact avec la vapeur ou des dépôts, les conditions changent complètement.

Admettons (fig. 168) que l'épaisseur de la couche de dépôts soit de 2 millimètres et que la vaporisation soit seulement de 50 litres par mètre carré dans ces nouvelles conditions. Les résultats des expériences de M. Hirsch nous permettent de poser approximativement 225° comme excès de température de la face chauffée de la plaque et 45° pour celle du tube. La différence des températures moyennes devient 90°, et l'agrandissement du trou 1/10 de millimètre, ce qui est plus que suffisant pour occasionner des fuites, car la pression intérieure tend à maintenir le diamètre d'origine des tubes.

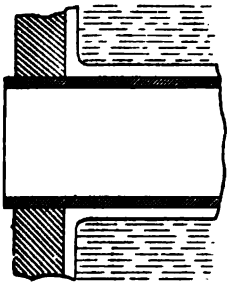


Fig. 168.

Voilà pourquoi, en pratique, les fuites aux plaques tubulaires disparaissent à la suite d'un nettoyage intérieur, sans avoir besoin de recourir à un nouveau mandrinage; celui-ci ne devient nécessaire que lorsque les contractions du métal, d'après les travaux de M. Wehrenfennig, ont détruit l'adhérence due au mandrinage. L'importance d'un entretoisement autre que celui des tubes entre deux plaques tubulaires est ainsi évidente. Cette dernière cause de fuite disparaît si on insère des tubes en fer dans une plaque tubulaire en cuivre ou des tubes en laiton dans une plaque tubulaire en fer ou acier.

[1] Voir page 114 et suivantes.

Digitized by Google

Dans la discussion qui a suivi la communication de M. Durston sur la température des plaques tubulaires (*Transactions of the Institution of Naval Architects*, vol. XXXIV, 1893), M. Stromeyer a relaté l'expérience suivante à laquelle il a assisté :

« On ignore généralement que le recuit ou la surchauffe d'une tôle de fer ou d'acier qui a été travaillée tend à lui faire reprendre la forme originelle. Ainsi une barre étirée à la machine à essayer ou martelée se raccourcit en la chauffant ; de même si on l'a raccourcie, le recuit la fait allonger. Voici une expérience qui le confirme : on alésa deux trous dans un fond plat en acier ; l'un des deux trous était parfaitement cylindrique et d'un diamètre ne permettant de recevoir un tube qu'à coups de marteau, lequel une fois en place fut mandriné comme d'habitude ; l'autre trou était alésé cône, et l'on y plaça un tube tourné également cône à son extrémité et qui dépassait la plaque de 3 millimètres environ. L'extrémité de ce tube avait été au préalable comprimée à froid et ensuite tournée. On plaça le fond sur un feu de forge après tamponnage des extrémités libres des tubes pour empêcher leur surchauffe par le passage des flammes à l'intérieur. On versa dans le fond une certaine quantité d'eau jaugée, ce qui, en notant le temps de l'évaporation totale, nous donna approximativement l'allure à laquelle le fond était soumis, environ 500 litres par heure et par mètre carré de surface de chauffe. L'eau fut renouvelée plusieurs fois, et comme les tubes ne montraient pas avoir pris du jeu, on laissa le fond à sec pendant cinq minutes. A ce moment la tôle tourna au bleu : on y versa de nouveau de l'eau et on continua pendant une heure, sans que l'insertion des tubes dans le fond fût endommagée. Alors, au lieu de verser de l'eau en une seule fois, on la versa par cuillerées ; la température de la tôle s'éleva rapidement et l'eau passa à l'état sphéroïdal ; au bout d'une heure environ la tôle commença à passer au rouge. Pour la refroidir on y versa une grande quantité d'eau, et immédiatement on constata du jeu à l'insertion des tubes. Le tube à extrémité comprimée et tournée cône avait un jeu à peine perceptible, tandis que le tube mandriné avait un jeu de 4,8 millimètres sur un rayon de 457 millimètres. Il n'y a pas lieu de s'en étonner, car en mesurant le diamètre de la partie mandrinée on vérifia

Digitized by Google

qu'il s'était contracté de 0,635 millimètre. L'extrémité du tube comprimé au contraire s'était dilaté là où elle avait pu, le diamètre de la partie qui dépassait la tôle étant devenu plus grand que celui du trou par où elle avait passé. L'examen du trou montra une modification de la conicité, qui ayant été établie à 1/12, était montée à 1/10, d'où l'on peut conclure que si la partie cône du tube s'était dilatée, le trou dans la tôle s'était dilaté encore plus. »

Un remède efficace aux fuites des plaques tubulaires consisterait donc à soumettre à une compression préalable à froid l'extrémité des tubes, ce qui permettrait de combattre dans une certaine mesure les effets de la surchauffe et ceux des alternatives de chaud et de froid.

Corrosions extérieures. — Le plus grave inconvénient des fuites, qu'elles se manifestent aux plaques tubulaires, aux rivures ou aux joints, c'est la corrosion extérieure du métal, cause la plus générale et la plus fréquente des détériorations des chaudières ; suivant les circonstances et l'endroit où elles se produisent, elles acquièrent rapidement ou lentement une importance suffisante pour diminuer la résistance de la partie où elles se manifestent au point de rendre dangereux le fonctionnement du générateur.

Les corrosions extérieures ne se produisent qu'au contact de l'eau et se manifestent surtout aux trous d'hommes ou de lavage, aux rivures, aux joints et dans les parties, le plus souvent basses, des générateurs en contact avec les maçonneries ; ces dernières sont celles qui donnent lieu aux corrosions rapides.

Les produits acides de la combustion, en se dissolvant dans l'eau des fuites, viennent augmenter cette action destructrice du métal. Lorsque les dernières surfaces de chauffe d'une chaudière sont disposées pour n'être en contact qu'avec de l'eau à basse température, la vapeur d'eau et l'acide sulfureux produits par la combustion se condensent sur les parois et produisent des corrosions générales : c'est le cas des réchauffeurs d'eau d'alimentation.

Digitized by Google

Dans les chaudières marines, les fonds et la partie inférieure du corps cylindrique se corrodent facilement, mais c'est surtout à la partie basse des foyers et des chambres de combustion que la destruction est très rapide, à cause des cendres humides qui s'y accumulent. Elles sont rongées en outre extérieurement au réservoir de vapeur par l'eau qui tombe du pont, et, quand on ne les installe pas sur une couche de mastic, elles sont détruites à la partie inférieure par l'air humide de la cale.

Aucune fuite apparente, quelque minime soit-elle, ne saurait être tolérée ; elle doit être étanchée promptement avec le plus

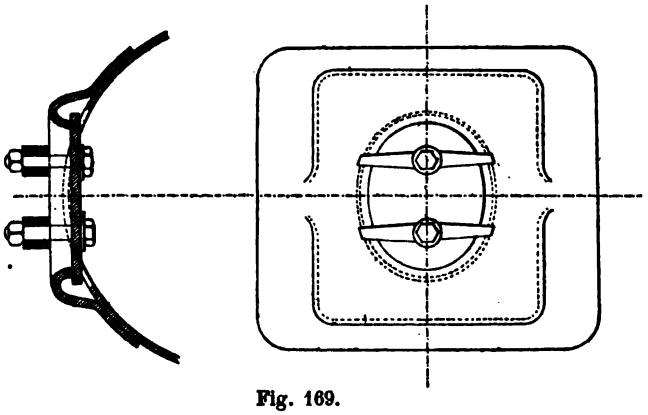


Fig. 169.

grand soin ; la recherche des fuites cachées doit être également une des préoccupations périodiques de tout propriétaire d'appareil à vapeur.

Pour les trous d'homme, que l'on rencontre rarement étanches, une excellente disposition est représentée à la figure 169. Leur bord est formé par l'embouti de la tôle, dressé et pénétrant dans une gorge de l'autoclave ; les fuites, avec ce dispositif, sont plus rares et peuvent être efficacement supprimées par un dressage des parties.

On trouve de nombreux exemples de corrosions de différentes origines dans le catalogue de l'Exposition collective des Associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur en 1889, et qui fixeront l'attention mieux que toute dissertation sur la matière. Parmi les pièces exposées, nous signalerons celles qui sont cataloguées sous les numéros 102, 103, 118, 127, 134, 145, 156.

Digitized by Google

Corrosions intérieures aux parties baignées. — A l'action destructrice des corrosions extérieures vient s'ajouter celle des corrosions intérieures. Celles-ci sont dues principalement à l'oxygène de l'air en dissolution dans l'eau d'alimentation ; à cette action s'ajoute celle des acides contenus dans certaines eaux d'alimentation, et dans les chaudières marines surtout celle de l'acide chlorhydrique provenant de la décomposition du chlorure de magnésium en dissolution dans l'eau de mer.

Les tôles d'acier paraissent être atteintes plus facilement que les tôles de fer par la corrosion intérieure, mais les grands avantages que présentent les premières ont fait rechercher les moyens de prévenir les corrosions intérieures plutôt que de revenir à l'emploi des tôles de fer.

Les acides qui sont libérés par les corps gras à la température de l'ébullition, attaquent le métal des chaudières tout autant que les acides minéraux, en formant avec la base du corps gras un savon ferrique. L'emploi d'une eau d'alimentation grasse avec du carbonate de soude comme réactif est très mauvais, car le savon de soude ne se forme que par réaction sur le savon ferrique ; les alcalis purs, soude et potasse caustique sont seuls à employer, en quantité limitée, car en présence du cuivre qui est entraîné dans les générateurs par le passage de l'eau dans le faisceau tubulaire des condenseurs par surface, ils provoquent des courants galvaniques qui oxydent le fer sur lequel se porte l'oxygène de la décomposition de l'eau ; mais le meilleur remède consiste à n'admettre pour le graissage que des huiles minérales, analysées au préalable pour s'assurer de leur neutralité parfaite.

L'eau distillée ou chargée de sels calcaires ne contient, à l'exception de l'air, aucun élément corrosif ; il en est autrement de l'eau de mer, qui dégage de l'acide chlorhydrique lorsqu'elle est concentrée au cinquième de son volume primitif. Cet acide et ses congénères, qu'on a parfois proposés pour débarrasser les générateurs des incrustations intérieures, sont à proscrire d'une façon absolue, tout comme l'emploi pour l'alimentation d'eaux courantes puisées en aval de fabriques de produits chimiques et des eaux de pluie dans les pays manufacturiers, celles-ci étant toujours à réaction acide.

Digitized by Google

L'emploi du zinc pour empêcher les corrosions intérieures a pris récemment un certain développement, surtout en marine. C'est ainsi que nous voyons M. Yarrow galvaniser son faisceau tubulaire à l'intérieur et à l'extérieur ; cela présente des inconvénients dans les générateurs à tubes d'eau de petit diamètre, car des plaques de zinc se détachent, obstruent les tubes et les font surchauffer et se déchirer ; le badigeonnage intérieur avec des sels de zinc (à l'exception du chlorure) paraît donner d'aussi bons effets que la galvanisation.

Toutefois ces applications sont trop récentes et trop limitées pour pouvoir en tirer des conclusions générales.

Nous avons vu au chapitre II, page 56, que l'eau pure n'attaque le fer que si elle contient de l'air en dissolution ; cette action oxydante est augmentée par la présence de l'acide carbonique, et encore par la présence des chlorures, le chlorure de magnésium possédant la plus grande énergie corrosive, en raison de son instabilité à la température de l'ébullition de l'eau dans les chaudières.

La quantité d'air en dissolution dans l'eau est en moyenne de 5 p. 100 de son volume, mais en général l'eau d'alimentation des générateurs en contient davantage, car il est impossible d'assurer l'étanchéité complète à l'air des garnitures des pompes alimentaires, et pendant la course de refoulement une quantité d'air supplémentaire se dissout dans l'eau à cause de la pression élevée ; on observe en pratique que les corrosions sont toujours plus intenses là où arrive l'eau d'alimentation. Dans les chaudières munies de réchauffeurs d'eau d'alimentation dans la vapeur, l'air se dégage à cause de l'élevation de température : on diminue ainsi les corrosions intérieures, l'oxygène étant entrainé par la vapeur et ne pouvant alors attaquer aussi vivement les tôles par réaction sur les sels contenus dans l'eau.

La figure 170, que nous empruntons, ainsi que la suivante, à l'ouvrage de M. Stromeyer (*Marine Boiler Management*), montre ce qui se passe sur les foyers lorsque l'alimentation se fait dans l'eau. Celle-ci tombe à la partie basse, et lorsqu'elle s'élève au niveau de la grille, l'air en dissolution est libéré et s'accroche à la tôle ; à cause de l'absence de circulation ces bulles ne se détachent

Digitized by Google

que lorsqu'elles atteignent un volume suffisant pour que la poussée de l'eau les y contraigne. Pendant leur développement l'oxygène, à cause de la haute température de la paroi, attaque le fer et forme des petites aspérités auxquelles s'accrochent plus longuement les bulles suivantes, pour arriver ainsi rapidement à des corrosions apparentes.

« Si l'alimentation se fait à la partie basse, dit M. Stromeyer,

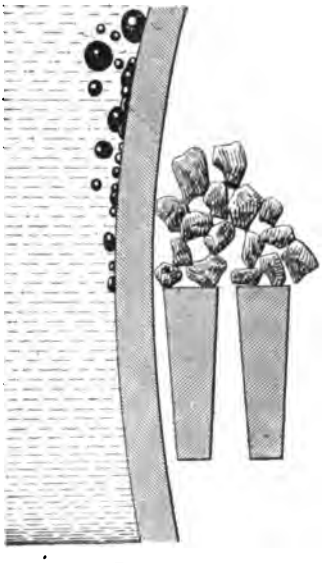


Fig. 170.

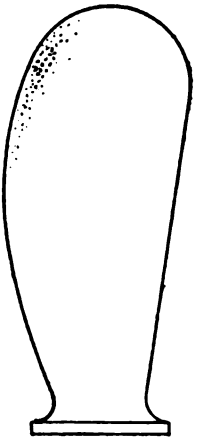


Fig. 171.

et si l'eau est saturée d'air, le calcul montre que chaque centimètre du foyer dégage environ 30 centimètres cubes d'air à l'heure, ce qui correspond à une bulle d'un peu plus d'un millimètre de diamètre par seconde. Les énormes différences de température dont le plan des grilles est le siège et les efforts auxquels ces parties des foyers sont soumises font que les écailles de rouille se détachent facilement, de sorte que de nouvelles surfaces métalliques y sont toujours exposées à l'action de l'air si l'eau n'en a pas été débarrassée au préalable. S'il y a corrosion dans les chaudières [1], on en trouve certainement le plus au plan des grilles. Une autre partie, qui est très vivement attaquée, c'est le

[1] M. Stromeyer n'étudie dans son ouvrage que les chaudières marines.

Digitized by Google

bas des foyers et des chambres de combustion, car l'air qui a pu s'y dégager ne peut plus s'en détacher. A l'appui de ce qui précède, il est utile de remarquer que des piqûres profondes sont très fréquemment relevées à l'avant des ailes des hélices, comme le montre la figure 171. L'air ici n'est pas libéré par la chaleur, mais se dégage par le vide partiel qui se produit en cet endroit, et malgré la grande vitesse de l'eau, il y séjourne suffisamment pour accomplir son œuvre destructrice. Les ailes en bronze sont parfois aussi rongées en cet endroit.

« Une autre confirmation se trouve dans la corrosion rapide des tuyaux intérieurs d'alimentation en fer; ceux en cuivre se détériorent également; là c'est la chaleur transmise à travers le métal qui dégage l'air. »

Les corrosions intérieures se présentent en général sous trois aspects, qui paraissent n'être que des formes intermédiaires : la piqûre, caractérisée par un grand nombre de petits trous réunis parfois par groupes irréguliers ; la pustule, poche plus ou moins profonde, remplie de poudre brune formée principalement par le sesquioxyde de fer ; la corrosion par surface.

Nous signalerons encore ici, à titre d'exemple, les spécimens de corrosions intérieures, exposés en 1889 par les Associations françaises de Propriétaires d'Appareils à vapeur, et notés à leur catalogue sous les numéros 172, 167, 175, 181, 166.

D'après les deux derniers exemples, on verra que les couches d'incrustation ne protègent pas les tôles contre les corrosions. Les fonds emboutis, s'ils sont soumis surtout à des efforts de flexion anormaux, peuvent se criquer dans les congés : l'eau qui s'infiltre dans ces fissures y provoque une corrosion rapide qui augmente le défaut primitif.

Corrosions intérieures aux espaces de vapeur. — Les corrosions intérieures sont plus rares dans les parties des générateurs qui ne se trouvent en contact qu'avec de la vapeur, mais elles y présentent une gravité exceptionnelle, car elles sont générales et progressives; en laissant subsister toujours la forme primitive, elles peuvent induire en erreur et passer inaperçues. Ainsi la figure 172 montre l'importance d'une corrosion à l'assemblage

Digitized by Google

d'un dôme de vapeur : la forme primitive des têtes de rivets avait été respectée par la corrosion, qui ne devint apparente que lorsque quelques-uns des rivets furent chassés par le marteau de sondage.

La figure 173 donne la forme corrodée d'une tôle de fond entretoisée dans l'espace de vapeur. La partie de la tôle respectée par la corrosion était prise lors des visites intérieures, pour la rondelle que l'on place parfois sous l'écrou : cette corrosion ne fut

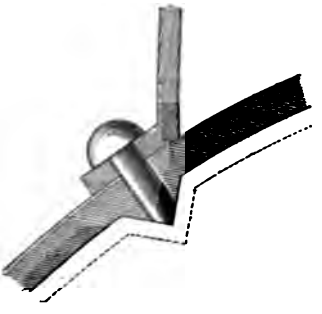


Fig. 172.

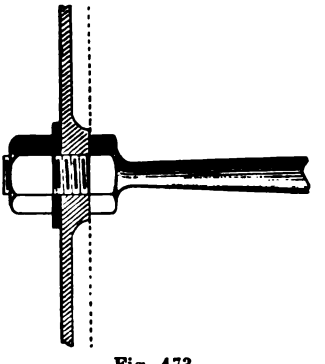


Fig. 173.

reconnue que lorsqu'on dut procéder à un remplacement d'entretoises.

On voit donc la gravité exceptionnelle que présentent les corrosions intérieures des espaces de vapeur et toute l'attention minutieuse à donner à l'examen de ces parties lors des visites intérieures. Les boîtes à fumée en contact avec des parties de l'espace de vapeur paraissent augmenter les phénomènes des corrosions intérieures, quoiqu'elles n'en soient pas une cause directe.

Théorie galvanique des corrosions intérieures. — Le phénomène des corrosions intérieures a reçu depuis quelque temps, en marine, une explication très ingénieuse : l'oxyde de fer est un corps électronégatif par rapport au fer ; si donc nous avons sur une tôle de fer, fig. 174, plongée dans l'eau de mer une partie dénudée A et une partie B recouverte d'oxyde, un courant galvanique ira de A vers B par le milieu d'eau salée et retournera vers B par la tôle. L'oxygène à l'état naissant qui se

Digitized by Google

dégage en A par l'électrolyse de l'eau y attaquera le métal. A la ligne de séparation des surfaces oxydées et métalliques, la force électromotrice d'un tel couple, en assimilant l'oxyde de fer au cuivre, serait de 0,276 volt et capable d'oxyder 1 gramme de fer par jour. A une distance de 25 millimètres de la ligne de séparation l'action du courant ne serait plus que 3 p. 100 de celle ci-dessus.

On peut en effet constater expérimentalement l'existence d'un courant dans les conditions qui précèdent en plongeant dans de l'eau acidulée ou salée deux électrodes en fer, l'une décapée, l'autre rouillée; mais le courant ainsi engendré diminue rapide-

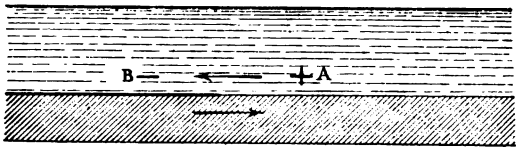


Fig. 174.

ment d'intensité et cesse bientôt : on reconnaît alors à l'examen que l'électrode décapée s'est oxydée. Ceci démontre que si des courants galvaniques peuvent se produire dans les conditions que nous examinons, ils devraient plutôt protéger les tôles contre toute oxydation intérieure. Les corrosions devraient, dans tous les cas, se limiter aux chaudières alimentées avec de l'eau salée ou acide, ce qui ne se vérifie pas en pratique, tous les générateurs étant sujets aux corrosions intérieures. On trouve aussi souvent, dans une même batterie, des chaudières indemnes et d'autres corrodées, et en général ce sont celles qui se trouvent à l'extrémité de la conduite d'alimentation qui portent les traces les plus importantes d'usure intérieure; et dans une même chaudière, si les corrosions se produisent dans les parties baignées, l'espace de vapeur reste sain ou vice-versa.

C'est à la suite de la théorie galvanique des corrosions que l'on a proposé l'emploi de plaques ou de grenaille de zinc à l'intérieur des générateurs; celui-ci est en effet rapidement rongé, mais les corrosions ne sont pas supprimées, car la résistance par l'eau entre le zinc et la partie des générateurs où se développeraient

Digitized by Google

les courants galvaniques est tellement grande que son action est forcément illusoire ; le badigeonnage intérieur au blanc de zinc paraît jusqu'ici le meilleur remède contre les usures intérieures, avec l'emploi d'eau d'alimentation peu chargée d'air et de tôles d'acier au nickel ; celles au manganèse paraissent être attaquées avec facilité.

Manques d'eau et alimentation intempestive. — Nous avons vu au chapitre II, qu'en fonctionnement normal, les surfaces de chauffe peuvent être dégarnies d'eau, bien que le niveau soit à la hauteur normale, et nous avons étudié les types de générateurs dont les dispositions facilitent la mise à sec des tôles de coup de feu ; il n'est donc pas surprenant que, lors de l'inspection des débris d'un générateur ayant fait explosion, on trouve des traces manifestes de surchauffe ; quoique celle-ci puisse être une des causes indirectes de l'accident, elle n'en est pas la cause immédiate : elle existe sur presque toutes les chaudières et elle ne concourt à un désastre que par la diminution de résistance qu'elle occasionne au métal surchauffé.

Lorsque M. Boutigny fit connaître ses travaux sur l'état sphéroïdal de l'eau et son explication des explosions des appareils à vapeur [1], le monde des savants et des ingénieurs accepta avec empressement cette dernière, et l'on posa en principe que, dans toute chaudière ayant des traces de surchauffe aux tôles de coup de feu, il y avait eu baisse du plan de niveau d'eau, mise à sec des tôles et alimentation sur ces parois portées au rouge. Dans ces conditions, tout abaissement de température ne permettant plus à l'eau de garder l'état sphéroïdal, provoquait un dégagement de vapeur tellement violent que les surfaces des orifices d'écoulement devenaient insuffisantes au dégagement de cette production instantanée, accompagnée d'une surélévation de pression tellement brusque que le corps de la chaudière, ne pouvant plus le contenir, éclatait.

Cette croyance est encore généralement répandue et acceptée, quoiqu'elle ait été démontrée entièrement fausse par des expériences et que la théorie la condamne également.

[1] Voir page 22.

Digitized by Google

Dans les expériences de M. Boutigny les vases avaient une très grande masse et l'eau était en faible quantité : dans les chaudières, c'est le contraire qui a lieu. Si nous supposons un mètre carré de tôle de 10 millimètres d'épaisseur portée au rouge à 700°, le nombre de calories contenues dans le métal sera de :

$$77{,}8 \text{ kilos} \times 700 \times 0{,}1138 = 6197{,}5 \text{ calories.}$$

Si la pression est de 5 kilogrammes et l'eau qui vient baigner la tôle a la température correspondante, il pourra y avoir transmission à l'eau de 4 798,7 calories, capables de vaporiser 9,7 litres d'eau. Cette vaporisation, quoique très rapide, ne serait pas instantanée ; la pression ne monterait pas brusquement, les soupapes souffleraient, l'écoulement par les conduits de service se ferait plus rapidement, et enfin l'eau d'alimentation arrivant à une basse température absorberait une notable partie de la chaleur contenue dans la tôle.

L'influence de ce faux principe, admis d'une façon absolue, a été des plus néfastes, car elle a empêché presque toujours des investigations approfondies sur les causes des explosions et leur étude : elle simplifiait les enquêtes et permettait de faire retomber les responsabilités sur les chauffeurs, dont les indications et les affirmations étaient régulièrement suspectées, si par hasard ils avaient échappé au désastre. Cette lourde erreur, officiellement dénommée dans une circulaire ministérielle du 24 juillet 1831 : « Accroissements brusques de tension qui seraient occasionnés par une circonstance accidentelle et qui paraissent être les causes ordinaires des explosions » a fait créer dans les statistiques administratives la rubrique des : *Manques d'eau, suivi ou non d'alimentation intempestive.*

Expériences de M. Fletcher sur les tôles de foyer portées au rouge. — M. Lavington E. Fletcher, directeur de l'Association des Propriétaires d'Appareils à vapeur de Manchester, a démontré expérimentalement la fausseté de ce principe admis ; la relation de ses remarquables travaux a été malheureusement peu répandue, et nous croyons intéressant de donner un extrait presque complet de son mémoire.

Digitized by Google

M. Fletcher commence par dire que, depuis nombre d'années, on a admis d'une façon générale que presque toutes les explosions de chaudières sont dues à un abaissement du niveau de l'eau suivi d'alimentation, et que ce principe adopté a eu une influence néfaste.

M. Fletcher explique que, lorsque les tôles sont portées au rouge, elles cèdent sous la pression normale de fonctionnement; en général, dans les chaudières à foyers intérieurs, ces accidents ne produisent pas beaucoup de dégâts; le ciel du foyer s'affaisse, mais le corps extérieur de la chaudière reste en place, de telle sorte que, si personne ne se trouve dans la direction du torrent d'eau et de vapeur qui s'échappe de la porte du foyer, il n'y a généralement pas de victimes; il faut toutefois faire exception pour les générateurs installés dans des espaces clos et limités, comme par exemple dans le cas de l'explosion à bord du steamer *Thistle* qui a eu lieu le 3 novembre 1869 et qui fit des victimes, dont la mort fut causée uniquement par des brûlures, sans qu'il y eut projection de débris. Le corps de la chaudière n'était ni avarié, ni déplacé.

M. Fletcher rappelle la théorie adoptée par les notabilités du monde savant et industriel, établissant que lorsqu'une explosion produit la rupture des générateurs en fragments projetés à grande distance, la cause doit nécessairement être imputée à un manque d'eau, faisant rougir les tôles, suivi d'une alimentation intempestive, produisant une énorme quantité de vapeur et une surpression considérable. Il reproduit ensuite les opinions émises à l'appui de cette théorie, par des ingénieurs choisis à dessein parmi les plus éminents, et conclut :

Que l'*Association des Propriétaires d'appareils à vapeur de Manchester n'admet pas l'opinion généralement acceptée sur les effets de la projection de l'eau sur les tôles de foyer portées au rouge.*

M. Fletcher passe ensuite en revue le résultat des enquêtes officielles sur plusieurs explosions de chaudières, qui ont toutes attribué à tort l'accident à un manque d'eau suivi d'alimentation intempestive, ce qui lui fait ajouter que l'*Association considère comme nuisible l'opinion généralement acceptée au sujet de la projection de l'eau sur des tôles rougies.*

Digitized by Google

Il insiste sur ce que cette opinion fait beaucoup de tort, car dans toute explosion on s'en tient à cette théorie, ce qui a pour résultat de faire négliger la recherche des véritables causes.

En admettant qu'il soit erroné de croire que la projection de l'eau sur des tôles portées au rouge produit un volume de vapeur qu'on ne saurait maîtriser, on était amené à déduire que lorsque par manque d'eau, les tôles d'un générateur rougissent, la meilleure chose à faire était d'ouvrir l'alimentation pour réduire la pression et rafraîchir les tôles, en empêchant ainsi l'affaissement des foyers. Cependant, malgré quelques expériences confirmatives antérieures sur des thermosiphons qui avaient démontré que l'on n'avait rien à craindre, la question suivante se posait : Quel sera l'effet produit sur les ciels de foyers ?

On sait que l'introduction de l'eau froide, dans une chaudière vidangée à chaud, a pour effet de contracter les tôles du bas et de soumettre les coutures à des efforts tels que quelquefois des déchirures se sont produites. De même il faut éviter d'introduire l'eau d'alimentation dans la partie inférieure d'un générateur en service parce que l'on a vu des rivets des coutures du bas être guillotinées par le retrait subit.

La question se posait donc ainsi :

Si l'on alimente sur des tôles de foyers au rouge, leurs rivures transversales ne seront-elles pas avariées et quel sera l'effet de cette manœuvre sur les ciels des foyers surchauffés ?

Cette question fut posée à plusieurs ingénieurs expérimentés, lesquels, tout en sachant que la chaleur spécifique du fer est tellement inférieure à celle de l'eau qu'il n'est pas possible dans ces circonstances de produire un grand volume de vapeur, hésitèrent cependant à formuler une opinion quelconque, et ne suggérèrent pour résoudre la question que des expériences pratiques.

Dans ces conditions, l'Association décida que l'on entreprendrait une série d'expériences concluantes sur une chaudière à foyer intérieur établie expressément dans ce but.

Il suffit de signaler le genre d'expériences, auxquelles on voulait se livrer, pour voir que leur réalisation n'était pas aisée. Ce n'était pas tâche ordinaire que d'avoir à relever des observa-

Digitized by Google

tions sur une véritable chaudière industrielle, en pleine pression, les feux brillants et les ciels de foyers portés au rouge.

Les sages donneurs de conseils ne firent pas défaut pour exagérer les dangers que l'on courait et prédire des désastres.

Ainsi qu'on le verra plus loin, des précautions furent prises non seulement pour protéger les observateurs, mais aussi pour garantir les tiers, et, pour déférer aux craintes qui avaient été émises, on a baissé les pressions de la vapeur après les deux ou trois premiers essais.

Disposition des expériences. — L'emplacement choisi était un terrain en plein air près des ateliers de chaudronnerie de M. Clayton à Preston.

La chaudière d'expérience était cylindrique à deux foyers intérieurs, assemblés par recouvrement à simple rivure sans être renforcés, ni par des rivures à bride, ni par des frettes (fig. 179).

Ce choix a rendu les expériences encore plus concluantes, que si on avait adopté un type de foyer intérieur plus moderne, ayant par exemple les joints longitudinaux soudés et les joints transversaux formés par des collerettes embouties et rivées.

Voici les dimensions de cette chaudière :

Longueur	$8^m,457$
Diamètre du corps extérieur	$2^m,133$
Diamètre des foyers	$0^m,914$

Épaisseur des tôles :

Corps extérieur	11 m/m 1
Tôles des fonds	14 m/m 3
Foyers	11 m/m 1

La matière employée était exclusivement la tôle de fer.

Les tôles de la façade et du fond étaient renforcées par quatre goussets au-dessus des foyers, par deux goussets au-dessous des foyers pour la façade, et un gousset au-dessous des foyers pour le fond.

Les dimensions de la grille étaient pour chaque foyer :

Longueur	$1^m,828$
Largeur	$0^m,914$
Surface	$1^m,670$

Digitized by Google

Le massif en maçonneries fut établi pour faire passer les produits de la combustion en deuxième retour sous la chaudière, et en troisième retour par les côtés.

Voici la liste des appareils montés sur ce générateur :

Deux clapets d'alimentation de 63 millimètres de diamètre mon-

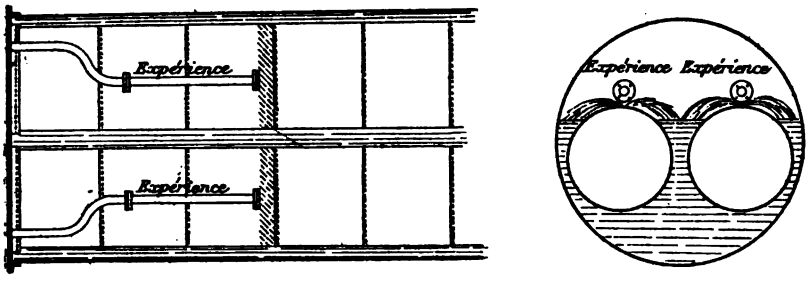


Fig. 175.

tés tous deux sur la façade, l'un à droite, l'autre à gauche. L'axe de ces clapets était à 152 millimètres en contre-haut du niveau des sommets des foyers et sur chacun d'eux était monté à l'intérieur de la chaudière un tuyau d'alimentation. Ceux-ci, suivant les règles ordinaires de l'Association, sont placés parallèlement

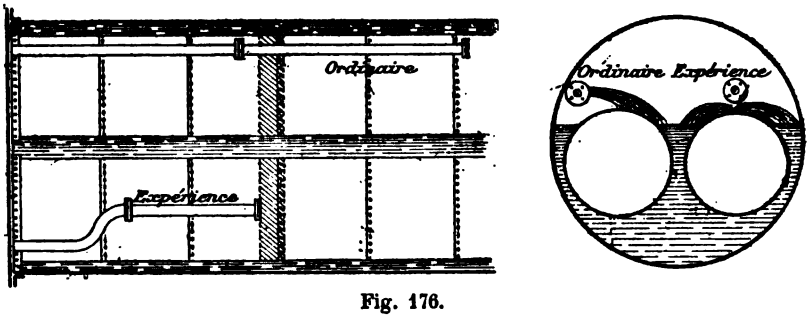


Fig. 176.

au flanc de la chaudière, et sont perforés sur le tiers extrême de leur longueur. Ils sont suffisamment longs pour que l'alimentation se fasse par côté et en arrière de l'autel.

Pour les expériences on avait estimé, pour que l'épreuve fut plus concluante, d'amener l'eau sur les tôles, dans l'axe des foyers et en avant de l'autel sur une longueur de $1^{m},142$.

Sur toute cette portion, le tube était percé à son arête inférieure de 32 trous en ligne (fig. 175 et 176).

Digitized by Google

Dans le cours des expériences, on a varié la disposition de ces tuyaux ; nous appellerons *alimentation ordinaire*, celle qui reste contre les flancs du générateur et injecte derrière l'autel ; et *alimentation d'expérience*, celle qui vient passer au-dessus des ciels de foyers et projette l'eau en avant de l'autel.

Les deux alimentations permettaient d'injecter sur l'un ou l'autre des foyers, ou sur tous les deux à la fois.

Deux indicateurs de niveau à tubes de verre fixés à droite et à gauche de la façade de la chaudière, mais à des niveaux différents.

Le bas de celui de droite était à 50 millimètres en contre-bas du plan des génératrices supérieures des foyers et le haut de celui de gauche à 50 millimètres en contre-haut de ce même plan. Chaque tube avait 457 millimètres de long; on pouvait ainsi vérifier le niveau de l'eau, sur une hauteur de 407 millimètres, soit au-dessus, soit au-dessous du plan des ciels des foyers et à partir d'un point situé à 50 millimètres au-dessus du niveau de la grille.

Un robinet de vidange de 63 millimètres de diamètre à presse-étoupe.

Un manomètre à maxima, de Schaeffer et Budenberg, de 177 millimètres et pouvant indiquer jusqu'à 10 kilog. 5.

Deux soupapes de sûreté, l'une de 76 millimètres de diamètre avec levier et contrepoids, et l'autre de 100 millimètres de diamètre à charge directe.

Les portes des foyers et des cendriers, devant être légères pour causer moins de dégâts en cas d'accidents, étaient en fer forgé.

Deux registres, un pour chaque carneau.

Trois tiges témoin fixées sur le sommet de chaque foyer, distantes de la façade la première de $1^m,219$, la seconde de $2^m,056$. la troisième de $3^m,657$.

Ces tiges de fer, tournées avec soin, étaient vissées sur la tôle du foyer et maintenues par un écrou dessus et dessous; elles traversaient le corps cylindrique en passant par un presse-étoupe, et permettaient de suivre le mouvement des foyers dans le sens vertical.

Digitized by Google

On avait établi deux robinets, pour pouvoir vérifier la température de l'eau à différents niveaux.

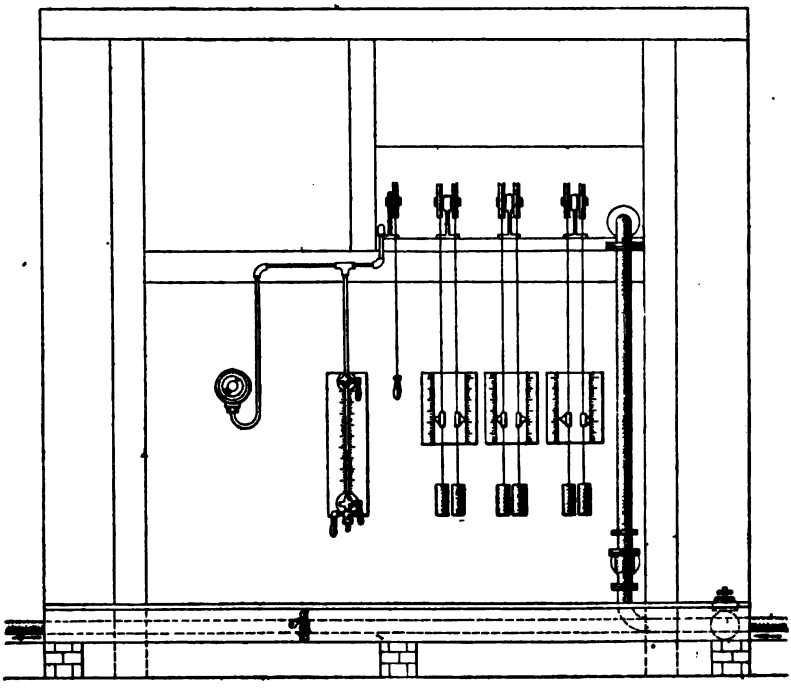


Fig. 177.

La *cheminée* qui recevait exclusivement les produits de la combustion de cette chaudière, avait 21^{m},95 à partir du sol, avec

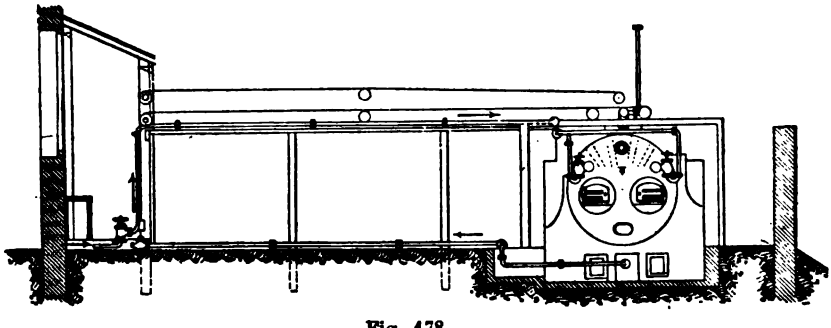


Fig. 178.

une section au sommet de 1^{m},30. Le carneau unique allant de la chaudière à la cheminée, avait 0^{m},687 de section.

Digitized by Google

On voit que ces dimensions étaient amples pour la chaudière.

Un manomètre à eau était fixé à la cheminée à $1^m,37$ du sol, afin de pouvoir évaluer le tirage en millimètres d'eau.

Mesures de précaution : Barricades. — Quoique le terrain fût de grandes dimensions, comme il y avait des voies publiques dans le voisinage, il était nécessaire de prendre toutes les précations possibles pour éviter des malheurs aux personnes étrangères à l'usine et protéger également les observateurs contre tout accident.

Voici les mesures qui furent prises :

1° Une forte barricade fut établie à $3^m,657$ devant la chaudière; elle avait $3^m,657$ de large et $2^m,134$ de hauteur, et se composait de chevrons de 76 millimètres cloués sur 2 pieux, le tout soutenu par un terre-plein (fig. 179).

2° Comme dans le cas d'affaissement des foyers la projection d'eau et de vapeur produit quelquefois un mouvement de recul, on avait couvert le haut des maçonneries à l'arrière de chevrons de 76 millimètres que l'on avait chargés de fonte en gueuses; de plus une barricade, semblable à celle de l'avant, faisait suite à la chaudière (fig. 179).

3° Pour les observateurs, on avait construit sur le côté de la chaudière et à 10 mètres un abri fait avec des chevrons de 73 millimètres (fig. 178).

Dispositifs mettant en rapport les observateurs avec la chaudière. — Afin de permettre aux observateurs d'agir sur la chaudière, tout en restant à l'abri, on avait pris les dispositions suivantes :

On avait établi dans l'observatoire un indicateur de niveau, à tube de verre et un manomètre à maxima. Les tuyaux d'alimentation et de vidange y passaient, et étaient munis des robinets d'arrêts nécessaires. Des cordes permettaient de manœuvrer les soupapes de sûreté.

Six échelles graduées, sur lesquelles marchaient les index reliés par des fils métalliques aux tiges fixées aux ciels des foyers, permettaient aux observateurs de suivre les mouvements

Digitized by Google

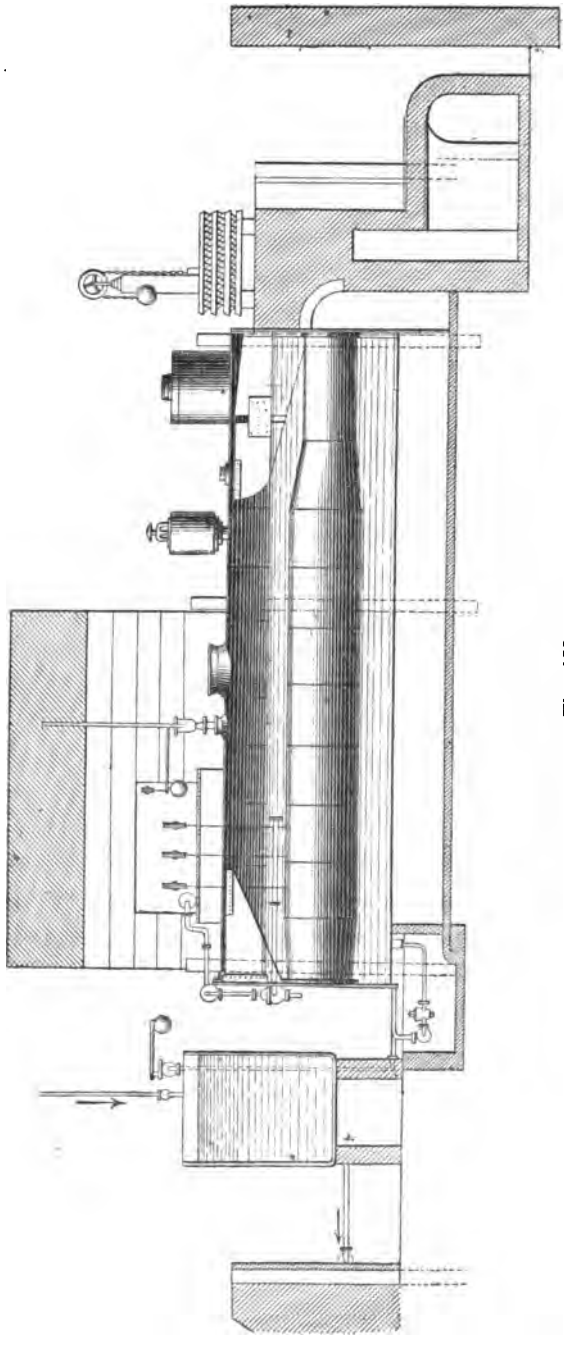


Fig. 179.

Digitized by Google

des foyers pendant les différentes phases des expériences. (fig. 177).

La *pompe alimentaire* avait un plongeur de 127 millimètres de diamètre et 305 de course ; celle-ci fut modifiée au cours de quelques expériences, ainsi qu'on le verra plus loin.

Cette pompe donnait plus de 141 litres par minute, ce qui aurait suffi pour alimenter 3 ou 4 chaudières semblables ; mais on avait jugé convenable de se servir d'une pompe aussi forte, pour pouvoir reproduire le cas d'une chaudière, faisant partie d'une batterie de trois ou quatre, venant à manquer d'eau et recevant seule toute l'alimentatien de la batterie.

La pompe marchait sans arrêt, le tuyau de refoulement étant muni d'une soupape de retour. Ce dispositif présentait l'avantage d'introduire l'eau dans la chaudière, sitôt que l'on ouvrait le robinet d'alimentation.

Jaugeage de l'eau d'alimentation. — Il était intéressant de mesurer la quantité d'eau injectée sur les ciels quand ceux-ci étaient au rouge. A cet effet on avait disposé près de l'observatoire une cuve en fonte, alimentée par l'eau de la ville, munie d'un tube de niveau gradué : les dimensions de cette cuve donnaient 16,73 litres pour chaque tranche de un centimètre.

Observateurs. — Les observateurs étaient au nombre de quatre : M. Lavington E. Fletcher, ingénieur en chef, M. George Higenbottam, ingénieur en chef adjoint, M. Richard Thompson, aîné des Inspecteurs, et M. W. N. Fowler, qui eut à surveiller le montage, compiler les notes des observateurs et aider à la rédaction du mémoire.

On avait dressé au préalable un programme pour chaque expérience et chaque observateur avait une tâche déterminée, afin d'éviter toute confusion.

En relevant les observations, on notait toujours l'heure exacte afin de pouvoir les comparer entre elles.

Observations sur la chaudière d'essai pendant la mise en

Digitized by Google

pression [1]. — Pour mesurer les mouvements verticaux du corps extérieur on avait disposé 3 traverses horizontales, une à chaque extrémité et la troisième au centre, passant près du sommet de la chaudière, portées par de solides poteaux placés en dehors des maçonneries. Ces traverses formaient des lignes de repère pour observer les mouvements de la chaudière.

Pour étudier les mouvements dans le sens de la longueur, on avait placé sur les maçonneries un grand compas à verge s'étendant d'un bout à l'autre de la chaudière et s'arrêtant à 75 millimètres de chaque extrémité.

L'une des pointes du compas restait à demeure dans un coup de pointeau et l'autre traçait les mouvements sur la tôle même de la chaudière, blanchie à la craie.

Les mouvements des foyers étaient indiqués par les tiges dont nous avons précédemment parlé.

On fit un feu doux sous la chaudière pendant quatre jours pour sécher les maçonneries, on tomba les feux la veille du jour des expériences et pendant la nuit les 2 registres furent laissés grands ouverts.

On alluma les feux à $2^h,20'$ le jour des essais : les mesures des déformations furent prises à des intervalles très rapprochés pendant la durée de la mise en pression, et la demi-heure suivante.

On constata que la partie supérieure du corps cylindrique s'était allongée de 9,5 millimètres, mais que dans le sens vertical les mouvements avaient été petits et moins importants qu'on ne les supposait.

Quant au mouvement des foyers, les résultats observés sont consignés au tableau suivant, où l'on voit que vers le milieu la courbure a atteint une flèche de 15 millimètres.

[1] Voir p. 191 et suivantes la partie relative aux différences de température de l'eau.

Digitized by Google

FOYER DE GAUCHE				FOYER DE DROITE			
DURÉE [1]	1re TIGE	2e TIGE	3e TIGE	DURÉE [1]	1re TIGE	2e TIGE	3e TIGE
Minutes.	Millimètres.	Millimètres.	Millimètres.	Minutes.	Millimètres.	Millimètres.	Millimètres.
0	ALLUMAGE DES FEUX			0	ALLUMAGE DES FEUX		
6	1,6	2,4	2,4	7	1,6	1,6	1,6
11	3,2	2,4	3,2	13	2,4	1,6	2,4
17	4,1	5,5	6,3	18	3,1	4,7	3,9
22	7,1	8,7	9,5	23	7,1	9,5	10,3
26	7,9	8,7	11,1	27	7,9	11,11	11,9
32	8,7	10,3	11,9	33	7,9	11,11	12,7
40	8,7	10,3	12,7	41	8,7	11,9	14,3
45	7,9	9,5	13,5	46	8,7	11,9	15,1
50	7,9	9,5	13,5	51	7,9	11,11	14,3
55	7,1	9,5	13,5	56	7,9	11,11	14,3
62	6,3	8,7	13,5	63	7,9	10,3	12,7
67	4,8	6,3	9,5	69	5,5	7,1	9,5
73	3,2	4,8	7,9	75	4,8	6,3	8,7
78	3,2	4,8	7,1	80	4,8	6,3	7,9
85	3,2	3,9	6,3	86	4,8	5,5	7,1
90	3,2	4,9	6,3	91	3,9	4,8	7,1
96	2,4	3,2	6,3	97	3,9	4,8	6,3

[1] Comptée à partir du moment de la mise en feu.

M. Fletcher fait ici remarquer que dans les chaudières à foyer intérieur il est nécessaire de ménager une certaine distance entre les extrémités des goussets et les rivures des foyers sur les fonds, afin de laisser à ceux-ci une certaine élasticité pour suivre les mouvements des foyers, et qu'il est inutile d'entretoiser le milieu des foyers avec la chaudière sous prétexte de les renforcer. Un support est superflu, une liaison est nuisible. Les diagrammes (fig. 180) permettent de suivre les mouvements des foyers, pendant cette période de $2^h,20'$ à $3^h,56'$. Le bas de la courbe, de $4^h,55'$ à $5^h,28'$ se rapporte à la suite de l'expérience que nous allons relater.

Expériences sur les tôles de foyers portées au rouge. — Dans ces expériences, il était nécessaire de connaître le moment précis où les tôles commençaient à rougir ; c'était le moment où l'on devait procéder à l'arrosage. Si l'on attendait trop longtemps, on risquait de voir les tôles s'affaisser sous l'effet de la pression et l'expérience était manquée ; elle était également

Digitized by Google

manquée si on lançait l'eau avant que les tôles fussent portées au rouge.

La détermination de ce moment précis n'était pas facile en regardant sous pression par la porte du foyer à cause du danger. Il fut ainsi décidé de faire un essai préliminaire à la pression atmosphérique, pour établir des données pour les expériences sous pression et en même temps étudier les points suivants :

1° Est-il vrai que la projection de l'eau sur les ciels des foyers portés au rouge produit un volume de vapeur tellement considérable qu'il devient ingouvernable et que les soupapes sont impuissantes à en débarrasser à temps la chaudière ?

2° L'action de l'eau froide sur les tôles des foyers ne produirait-elle pas des déchirures sur les coutures transversales, analogues à celles déjà observées dans les coutures du bas de certaines chaudières, où l'introduction de l'eau d'alimentation se faisait à un niveau très bas ?

Expérience n° 1. — A la suite des observations préliminaires relatées plus haut, le niveau de l'eau fut amené à 4h,45′ au plan des ciels des foyers, les soupapes de sûreté ouvertes en plein. Les feux furent bien chargés, et le robinet de vidange ouvert en plein de 4h,50′ à 5h,10′, le niveau ayant baissé à 406 millimètres en dessous du plan des ciels, à environ 50 millimètres au-dessus du plan des grilles. A 5h,15, 25 minutes après le début de la mise à découvert des ciels, la soupape à charge directe fut fermée, mais celle à levier par inadvertance resta ouverte. A cet instant même on alimenta sur les deux foyers par les *alimentations d'expérience,* avec de l'eau à 16°,6 et à une allure de 2,5 litres par seconde. La pression monta de 0,420 kilo à 0,840 kilo en 1,1/4 minute. L'alimentation se continuant, la pression tomba à 0,070 kilo en 1,3/4 minute.

Expérience n° 1 a. — Une des soupapes étant restée ouverte on décida de répéter immédiatement l'expérience.

A 5h,42′ les deux soupapes furent ouvertes en grand ; le niveau de l'eau était tangent aux sommets des foyers, la pression de 0,21 kilo : le robinet de vidange fut ouvert en grand et fermé 12 minutes après, le plan d'eau descendit à 50 millimètres au-dessus du plan des grilles.

Digitized by Google

Quatorze minutes après que l'eau avait commencé à descendre, on ferma les soupapes et on ouvrit en grand sur les deux foyers les *alimentations d'expérience*, les feux étant clairs et brillants, épais d'environ 18 centimètres, et les registres ouverts en plein.

Aussitôt que l'eau arriva, la pression en 3/4 de minute monta de 0,420 kilo à 1,890 kilo, puis elle se mit à décroître graduellement pour tomber à 0,420 kilo en 12 minutes 1/2 et con-

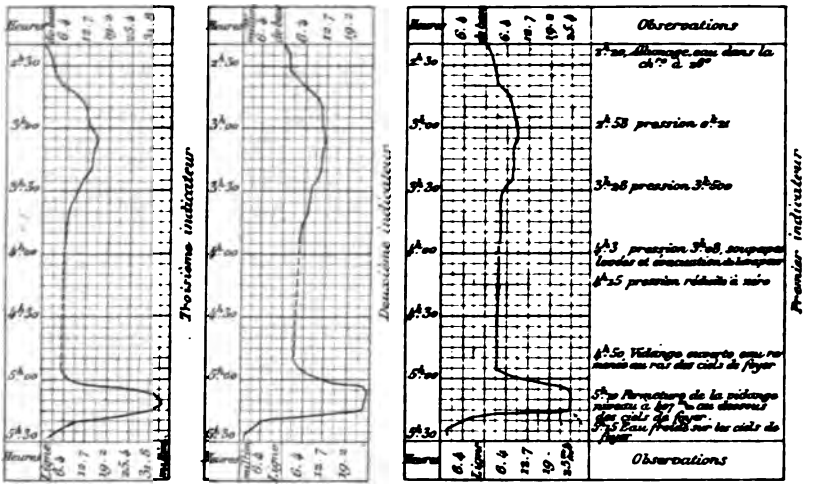


Fig. 180.

tinuant à alimenter on arriva au niveau des sommets en 20 minutes ; la pression n'était plus que de 0,280 kilo.

Le feu était tel dans cette expérience que l'on constata sur le ciel du foyer de gauche, deux poches ayant l'une 50 centimètres sur 23 et l'autre 25 centimètres sur 15. Les mouvements des foyers, graduellement surchauffés et ensuite refroidis, sont enregistrés sur les diagrammes (fig. 180) : la partie de la courbe de $4^h,55'$ à $5^h,28'$ se rapporte à ces mouvements.

En examinant les foyers après l'essai, on remarqua que les rivures au-dessus du feu s'étaient affaissées et que la plus grande distorsion avait lieu sur le foyer de droite, qui s'était ovalisé de 88 millimètres.

Cependant les foyers ne présentaient aucune des déchirures qu'on supposait devoir se produire, et il n'y avait pas eu production instantanée d'une énorme quantité de vapeur.

Digitized by Google

A l'exception de l'affaissement des foyers et des coutures déformées, il n'y eut aucune autre avarie.

Quant au volume de vapeur produit, il n'avait pas été suffisant pour faire souffler les soupapes ; en effet elles étaient chargées pour $3^k,51$ de pression, et celle-ci n'avait pas dépassé $1^k,83$.

Expérience n° 2. — Les tôles déformées par l'essai précédent furent remises sur la machine à cintrer, puis rivées à neuf, et la chaudière essayée à 7 kilos ; l'épreuve ayant été bonne, on procéda à la 2e expérience. La donnée était celle-ci :

Il est généralement admis que lorsqu'on s'aperçoit du commencement d'un affaissement, on a le temps de tomber les feux et de conjurer le danger.

M. Fletcher cite un exemple d'explosion où les deux chauffeurs ont été tués par l'eau et la vapeur sortant d'un foyer dont ils tombaient le feu, parce qu'ils s'étaient aperçu d'un affaissement du ciel.

Il s'agissait d'être fixé sur cette opinion.

On décida d'utiliser une des tiges témoin dont nous avons déjà parlé, et qui servait à étudier les déformations des pièces, pour indiquer le moment où les tôles étaient au rouge. Pour cela, on fixa celle du milieu sur un disque en plomb fixé lui-même au ciel du foyer ; ce disque, en fondant, faisait tomber le contrepoids du côté de l'observateur. On disposa en plus deux bandes de plomb (deux par foyer), ayant 37 millimètres de large et 1,5 millimètre d'épaisseur. Ces bandes étaient couchées sur les foyers, l'une à $1^m,20$ de la façade, l'autre à $1^m,82$; elles devaient indiquer par leur fusion que la température du rouge avait été atteinte.

Un observateur était à chacun des index pour guetter le moment où le ciel commençait à s'affaisser.

On monta en pression pour arriver à $3^k,43$, et on fit des essais sur la température, essais qui confirmèrent ceux déjà indiqués. Puis on laissa souffler la vapeur pour tomber à $2^k,81$ et les soupapes furent réglées pour cette pression.

Les feux étaient vifs et les registres ouverts en plein, l'eau étant à 150 millimètres au-dessus du plan des ciels.

Digitized by Google

On ouvrit alors le robinet de vidange, et en huit minutes l'eau était à 380 millimètres au-dessous du plan des ciels, à 75 millimètres au-dessus du plan des grilles ; on ferma la vidange et on veilla aux index.

Pendant cette opération les index indiquèrent que les foyers se cintraient vers le haut, et six minutes après que l'on eut atteint le niveau inférieur, les index qui n'avaient pas de disque accusèrent une marche rétrograde sur le foyer de droite, et qui annonçait qu'il s'affaissait. Dès que l'on s'aperçut de ce fait, on donna l'ordre d'alimenter ; mais le robinet était à peine ouvert,

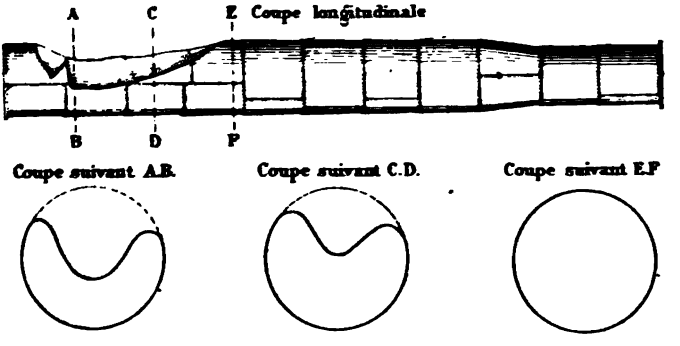


Fig. 181.

que le foyer de droite se déchirait. Il paraîtrait que l'affaissement avait commencé avant l'ouverture du robinet et que l'alimentation n'avait pas été introduite assez à temps. C'est l'avis qu'on formula à ce moment, et que d'autres expériences paraissent confirmer.

Le foyer s'était déchiré à la première rivure et par cette ouverture s'élança un torrent d'eau et de vapeur qui, frappant avec violence la butte qui se trouvait en face, faisait voler de tous côtés le charbon qui était devant la chaudière. Les morceaux de charbon vinrent frapper avec force le réservoir d'alimentation qui était pourtant à dix mètres de distance dans un plan perpendiculaire à la trajectoire de l'eau ; des morceaux tombés dans le réservoir causèrent des ennuis dans une des expériences suivantes en obstruant la pompe.

La partie supérieure de l'autel avait été emportée dans le carneau inférieur, et ne s'était arrêtée qu'à la murette de devant.

Digitized by Google

Les portes du foyer et du cendrier n'avaient pas été endommagées, pas plus que le corps cylindrique qui n'avait pas bougé.

Le foyer de gauche ne semblait pas avoir souffert, cependant en le calibrant, on constata que le sommet était affaissé de 25 millimètres. La figure 181 donne des croquis du foyer avarié.

Les observateurs furent très surpris de voir que les tiges fixées sur les disques fusibles n'avaient donné aucune indication. Cependant le disque et les bandes de plomb avaient fondu et

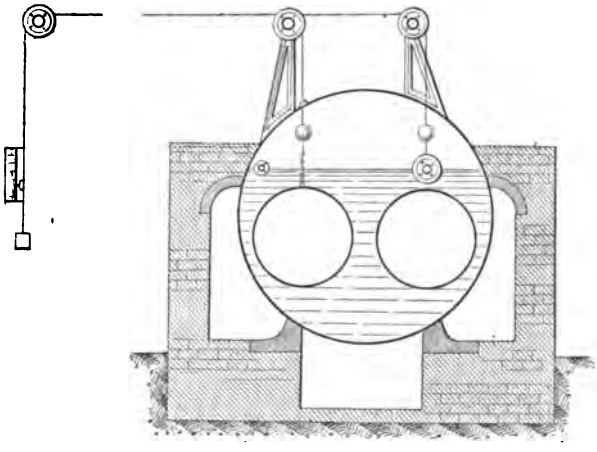


Fig. 182.

étaient tombés dans le bas de la chaudière ; après vérification, on constata que les presse-étoupes des tiges, trop serrés, avaient annulé l'effet des contrepoids.

Dans tous les cas, il résulte de cette expérience que lorsque un ciel de foyer est surchauffé, il peut s'affaisser sans avertissement préalable ou du moins dans un laps de temps très court ; que lorsque la moitié supérieure d'un foyer est au rouge, une fois l'affaissement commencé, c'est l'affaire d'un instant pour que tout soit détruit ; et que vouloir compter sur l'effet graduel de cet affaissement pour tirer le feu est une opération des plus hasardeuses.

Expériences n° 3 et 3 a. — On commença d'abord par modifier les indicateurs en remplaçant la tige rigide par une chaîne et un petit contrepoids intérieur qui permettait de faire jouer le système et de s'assurer du bon fonctionnement du presse-étoupe (fig. 182).

Digitized by Google

Dans cette expérience, on se plaça dans les conditions ordinaires de la pratique ; au lieu d'abaisser le niveau en ouvrant la vidange, on amena celui-ci à être tangent aux sommets des foyers et on laissa l'eau baisser par évaporation comme cela arrive dans une chaudière ordinaire dont le chauffeur a négligé de surveiller le tube de niveau.

En opérant ainsi on pouvait procéder graduellement, c'est-à-dire laisser passer un certain temps entre le moment où le niveau était tangent au sommet et le moment où l'on ouvrait l'alimentation, et, suivant les effets observés, augmenter progressivement cette période d'attente.

Une première expérience (n° 3) fut faite dans ces conditions.

Les soupapes, réglées pour $2^k,10$, soufflaient fort. Le niveau ayant été amené par vidange au plan des ciels, on attendit 5 minutes et on ouvrit. L'alimentation était normale, c'est-à-dire par côté en arrière de l'autel : débit 141 litres par minute ; les feux vifs, registres grands ouverts. Il ne se produisit pas d'augmentation de pression, ni aucune avarie apparente au foyer.

On recommença l'opération (n° 3 A), avec l'intention d'attendre 10 minutes. L'expérience était en train, 7 1/2 minutes s'étaient écoulées lorsque la pompe s'arrêta.

La position était critique. Les ciels à découvert, pas d'eau et il ne fallait pas songer à se présenter devant la chaudière.

On décida alors de lever les soupapes et de fermer les registres.

En 8 minutes la pression tomba de $2^k,53$ à $0^k,840$; 8 minutes après, la pompe pouvant enfin marcher, on ouvrit l'alimentation, l'eau étant à 7 centimètres en dessous des sommets des foyers.

La pression commença à tomber et en 13 minutes elle était à zéro.

La pompe s'arrêta encore et, vérification faite, on trouva son clapet d'aspiration obstrué par le charbon qui était tombé dans le réservoir pendant l'explosion de l'expérience n° 2.

Expériences n° 4 et 4a. — Ces expériences sont semblables aux précédentes, avec des intervalles de 10 et 15 minutes depuis la mise à découvert des ciels. On constata toujours une chute de pression au moment où l'alimentation était ouverte.

Digitized by Google

Expériences n° 5, 5*a*, 5*b*, 5*c*. — Dans les expériences 4 et 4*a*, on avait été obligé de réduire à moitié la course de la pompe, l'arbre de commande étant trop faible. Après réparation, l'expérience n° 5 fut réalisée dans les mêmes conditions que celle n° 4 et avec les mêmes résultats, mais avec un volume d'eau d'injection double. Seulement, comme on commençait à avoir confiance, on restait devant la chaudière même après que les ciels commençaient à se découvrir, ce qui permettait d'alimenter les feux et de les avoir plus vifs.

Dans l'expérience n° 5*a* le niveau amené aux sommets des foyers, les feux avaient 23 centimètres d'épaisseur ; les registres grands ouverts, le tirage était de 12 millimètres ; les deux soupapes soufflaient en plein avec une pression de $1^k,9$.

Après 15 minutes d'attente l'eau avait baissé de 52 millimètres laissant les ciels à découvert sur un développement de 48 centimètres. A ce moment une *alimentation normale* fut ouverte : celle du foyer de droite, débit 146 litres, température 8°.

Pas d'augmentation de pression, au contraire une chute, car en 1,1/2 minute la pression de 2 kilogs tombe à $1^k,89$.

Après l'expérience, à la vérification, on ne put constater aucune trace de déformation des foyers.

On a vu que dans les expériences précédentes on avait fait usage de l'alimentation normale, c'est-à-dire du tuyau latéral avec trous par côté et eau en pluie. Les expériences n°s 5*b* et 5*c* ont été faites avec l'alimentation d'expérience, c'est-à-dire les jets verticaux et frappant normalement les tôles. L'expérience n° 5*b* a été faite avec 10 minutes d'attente et 35 centimètres de développement du foyer à découvert; l'expérience n° 5*c* a été faite après 15 minutes et 48 centimètres de découvert.

Dans les deux cas il n'y a pas eu augmentation de pression ; mais, au contraire, diminution marquée.

Après expérience, dans les deux cas, on ne constata aucune déformation, mais seulement un suintement dans les premières coutures des foyers.

Il faut remarquer que dans ces expériences on ne s'était servi que d'un seul tuyau d'alimentation, celui qui frappait sur le sommet du foyer de droite.

Digitized by Google

En examinant l'intérieur des foyers, on constata que celui de gauche présentait des caractères très nets d'une surchauffe au-dessus de la grille. La tôle était couleur de rouille et dépourvue de suie sur les 1re, 2e, 3e et 4e viroles et sur un développement de 45 à 50 centimètres.

La coloration commençait au milieu de la première virole et finissait au milieu de la quatrième, juste à l'autel.

Dans le foyer de droite, il y avait aussi une coloration, mais qui était beaucoup moins accusée, sauf au-dessus de l'autel où elle avait 15 centimètres de développement.

En visitant intérieurement la chaudière on constata que les bandes de plomb qui étaient posées sur les 2e et 3e viroles du foyer de gauche étaient coupées et tombées au fond et que le disque en étain était fondu en partie, suffisamment pour se dégager des vis en cuivre qui le retenaient.

Sur le foyer de droite, la première bande placée sur la 2e virole était coupée et tombée au fond; mais celle de la 3e virole qui était directement sous la pluie d'alimentation n'avait fondu qu'en partie et ne s'était pas coupée; il en a été de même du disque de ce foyer.

Expérience n° 6. — Cette expérience a été faite à peu près dans les mêmes conditions, mais en attendant qu'un des disques vînt à lâcher : cela s'est produit 17 minutes 1/2 après le moment où l'eau était tangente au plan des ciels.

En ce moment l'eau était descendue de 8 centimètres laissant à découvert un développement de 50 centimètres.

A la chute du contrepoids, on ouvrit une alimentation d'expérience, celle de droite, température de l'eau 10°, débit 146 litres, pression 2kg,10, les soupapes soufflant fortement. Pas d'augmentation de pression, au contraire chute à 1kg,9.

A l'examen de la chaudière, on trouva que les bandes fusibles étaient fondues au milieu sur des longueurs de 200 à 225 millimètres et que les disques avaient partiellement fondu.

Les foyers n'avaient pas de traces de surchauffe, mais en regard des grilles la suie était brûlée par places.

Expérience n° 7. — L'examen des disques fondus ayant fait supposer que les tôles avaient dû atteindre une température plus

Digitized by Google

élevée que celle correspondant au point de fusion des disques, on décida à la suite d'expériences préliminaires de placer, en outre des disques fixés par trois vis, des boulons d'alliage fondant à la température du rouge. A ces boulons étaient attachés des fils

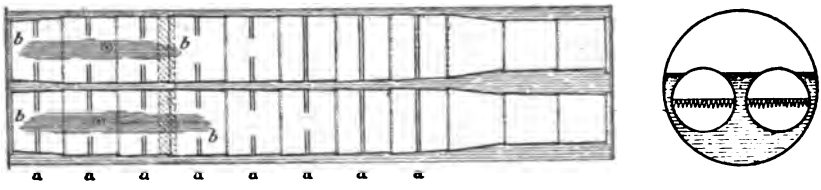


Fig. 183.

avec contrepoids : les boulons en fondant se coupaient et permettaient au contrepoids de tomber. Après plusieurs essais faits sur une tôle chauffée directement par un feu de coke, on décida de n'employer que des disques en zinc, ceux-ci ne lâchant le contrepoids que lorsque la tôle était au rouge cerise, et on fit l'expérience n° 7.

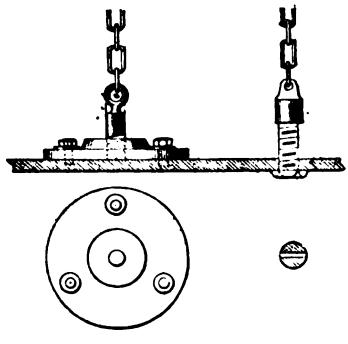


Fig. 184.

Chaque foyer fut muni d'un disque en zinc et de deux boulons, un en plomb, l'autre en étain. De cette manière, on était graduellement averti de l'échauffement des ciels (fig. 184).

Outre ces pièces fusibles, on disposa des bandes de plomb de $1^{m},20$ sur 37 millimètres, épaisses de $1^{mm},5$, sur le milieu des huit premières viroles de chaque foyer. Elles devaient indiquer sur quelle longueur les ciels avaient été chauffés (fig. 183).

Les feux ayant été allumés deux jours avant pour que les carneaux fussent chauds, l'expérience commença à 6 heures, le manomètre à zéro. A 6 heures 23 minutes les deux soupapes qui étaient chargées pour une pression de $1^{kg},75$ commençaient à souffler. Le niveau était à 23 centimètres au-dessus des ciels de foyer.

La vidange ouverte, en 8 minutes l'eau fut tangente au plan

Digitized by Google

des ciels, et on ferma la vidange. Les registres étant ouverts en grand : le tirage mesuré de 12 millimètres d'eau ; avant de se retirer dans l'observatoire on chargea les feux à 23 centimètres d'épaisseur. La pression avait atteint 2,07 et les soupapes soufflaient à toute volée. Voici maintenant les phases de l'expérience :

18 minutes après avoir mis l'eau tangente aux sommets, le boulon en plomb de gauche fondait.

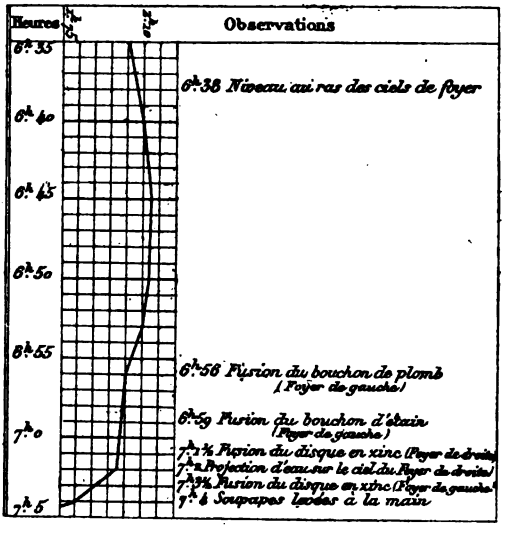


Fig. 185.

21 minutes après, le boulon en étain du même côté fondait aussi. 23 minutes 1/2 après c'était le disque en zinc du foyer de droite. On lança alors l'eau par le tube d'*alimentation d'expérience* sur le foyer de droite.

Le niveau à ce moment était à 85 millimètres en dessous du plan des ciels et la surface découverte avait 530 millimètres de développement. La température de l'eau était de 15° et le débit de la pompe de 127 litres par minute ; la pression de 2 kilogrammes, les soupapes soufflant.

Il ne se produisit pas d'augmentation de pression : au contraire en 2 minutes 1/2 elle était tombée de 2 kilogrammes à $1^{kg},82$; à ce moment les soupapes furent ouvertes pour faire tomber la pression.

Digitized by Google

Le disque en zinc du foyer de gauche avait fondu 2 minutes après la mise en route de l'alimentation.

Les variations de la pression sont inscrites au diagramme de la figure 185.

A l'examen, on remarquait une coloration de la surface des tôles s'étendant sur une largeur de 30 centimètres et une longueur de $2^m,43$ pour le foyer de gauche et de $2^m,74$ pour celui de droite.

La partie surchauffée était parfaitement distincte, elle était rouge brique tandis que le reste était noir de suie.

A la septième couture de chaque foyer on constata une criqure au recouvrement des tôles, mais la forme générale des foyers n'était pas sensiblement altérée, sauf trois bosses dans le foyer de droite, comme suit :

Deux bosses à la deuxième virole, la première mesurant 30 centimètres sur 17 centimètres et $6^{mm},3$ de flèche, la deuxième 30 centimètres sur 23 centimètres et $4^{mm},7$ de flèche.

Une bosse à la troisième virole de 28 sur 25 centimètres et $3^{mm},9$ de flèche.

Les deux disques avaient fondu, mais les presse-étoupes des boulons zinc et étain du foyer de droite avaient retenu les tiges, ce qui explique pourquoi l'on n'avait pas reçu d'avertissement à l'observatoire.

Les cinq premières bandes de plomb du foyer de gauche ainsi que les six premières du foyer de droite avaient fondu. On retrouva le plomb en grenaille.

On pouvait se rendre compte de la distance à laquelle les foyers avaient été chauffés, par ce fait que la dernière bande fondue sur le foyer de droite était à $4^m,25$ de la façade, soit à $2^m,13$ en arrière de l'autel (fig. 183).

Il était donc certain que les ciels des foyers avaient été portés au rouge.

Remarques additionnelles. — Si l'on supposait que l'eau projetée sur les tôles rougies était à l'état sphéroïdal et qu'un volume de vapeur beaucoup plus considérable se serait peut-être produit si elles avaient été portées à une température moins élevée, il suffira de faire remarquer que l'alimentation n'ayant

Digitized by Google

pas été interrompue, les tôles ont passé par tous les degrés de température, depuis le rouge jusqu'à la température de l'eau correspondant à la pression de la vapeur dans la chaudière.

On peut se demander aussi de quelle façon les résultats obtenus auraient été modifiés si l'on avait réalisé les essais sous une pression plus élevée, par exemple 6 kilogrammes, ce à quoi on répondrait que dans ce cas les foyers auraient été renforcés par des assemblages à bride ou tout autre dispositif et alors la pression de 6 kilogrammes devenait moins dangereuse que celle de $2^{kg},14$ avec des foyers lisses.

D'un autre côté, si l'on était monté à une pression de $3^{kg},5$, il est fort douteux que les ciels eussent supporté cette pression sans céder sous l'action des feux très vifs, maintenue pendant vingt-trois minutes et demie ; l'expérience n'aurait pas été complète, car plus les tôles étaient à haute température plus grand était le volume de vapeur dégagé au moment de l'alimentation.

Pendant l'expérience n° 2, il n'a fallu que quatre minutes pour que le robinet de vidange, de 63 millimètres de diamètre, ait amené le niveau de l'eau qui était à 152 millimètres au-dessus du plan des ciels à ce même plan, et quatre autres minutes pour le faire baisser jusqu'à 76 millimètres au-dessus du plan des grilles. Or à la suite de ce robinet, le tuyau de décharge de 76 millimètres de diamètre avait 27 mètres de long : si ce tuyau avait été plus court la vidange aurait été encore plus rapide. Il n'a fallu que dix minutes comptées à partir du moment où les ciels ont commencé à être découverts pour causer l'affaissement d'un des foyers. Ce renseignement eût été utile à connaître par le propriétaire d'un générateur qui fit explosion à Hull, le 13 juillet 1874. Le robinet de vidange avait été ouvert et s'était coincé : le chauffeur essayait de le fermer lorsque le foyer se déchira occasionnant au propriétaire et au chauffeur des brûlures mortelles. Le fait que dans la chaudière d'expérience le foyer se déchira, sous une pression de $2^{kg},100$ dix minutes après qu'il commença à être découvert, donne donc un avis fort utile, d'autant plus qu'il est à remarquer qu'à une pression plus élevée la vidange et l'affaissement eussent été plus rapides.

Résumé. — M. Fletcher regrette que ces expériences n'aient

Digitized by Google

pu être continuées : mais on fit des objections au sujet des dangers qu'elles présentaient dans le voisinage de voies publiques. Car, malgré la confiance des expérimentateurs sur l'impossibilité d'une explosion par la projection d'eau froide sur les tôles rouges des foyers, ces expériences n'étaient pas sans danger.

En effet, des feux vifs sous des tôles rouges dans une chaudière sous pression ne sont pas choses faciles à gouverner : il suffisait, par suite d'inattention, de manquer le moment où les tôles devaient être rafraîchies pour permettre à celles-ci de s'affaisser et de produire une explosion ; on objecta en outre que la rupture d'un foyer pourrait entraîner la rupture du corps de la chaudière, laquelle aurait éclaté en projetant des débris partout, et que cela ne pouvait être toléré qu'avec une chaudière établie en plein champ, sans risques pour personne excepté pour les expérimentateurs.

M. Fletcher chercha à se procurer par voie d'annonces un champ où ses expériences pussent être continuées ; mais personne ne répondit. C'est alors que l'Association se décida à publier son rapport, pensant qu'il pouvait jeter quelque lumière sur cette question restée jusqu'ici obscure.

M. Fletcher passant en revue les résultats de ses expériences, dit qu'ils démontrent que le fait de jeter de l'eau sur des ciels de foyers portés au rouge non seulement ne produit pas un volume extraordinaire de vapeur, mais au contraire occasionne un abaissement de pression.

Ce n'est que dans les expériences n° 1 et dans celle plus complète n° 1 A, que l'on a vu la pression monter rapidement de 0,41 à 2 kilogrammes pour redescendre ensuite ; mais M. Fletcher fait remarquer que l'on se trouvait là dans des conditions particulièrement aggravantes.

En effet, dans la pratique, au lieu de projeter l'eau normalement contre les tôles au-dessus du feu, on se sert toujours de tuyaux déversant l'eau vers le fond de la chaudière, latéralement et en arrière de l'autel. En outre les soupapes ne soufflant pas mais au contraire étant fermées juste au moment de la mise en route de l'alimentation, l'augmentation de pression ne se serait probablement pas produite si la vapeur qui se dégageait librement, n'avait été tout à coup forcée de s'emmagasiner.

Digitized by Google

Il termine son résumé en disant qu'il résulte de ces expériences, telles qu'elles ont été poursuivies, que lorsque les ciels de foyers sont découverts, le mieux à faire dans la majorité des cas, c'est ouvrir l'alimentation quand celle-ci se fait en arrière de l'autel : de cette façon, on raffermira les tôles et on donnera au chauffeur le temps de tirer son feu. Cependant comme il s'agit ici de la sécurité personnelle de ceux qui sont chargés de la conduite des chaudières, il faut agir avec beaucoup de prudence, car M. Fletcher a soin de faire remarquer qu'il considère que ces expériences ne suffisent pas pour permettre d'établir une règle absolue applicable à tous les cas : il aurait fallu en faire d'autres que les circonstances ne lui ont pas permis d'effectuer.

M. Fletcher s'adressant au personnel des chaudières, dit qu'il est très difficile (et ce serait prendre une grande responsabilité) de vouloir indiquer ce qu'il y a à faire dans chaque cas lorsqu'on a laissé abaisser le niveau, mais que la manœuvre de tomber les feux est dangereuse, car personne ne saurait dire le point d'affaissement auquel se trouve le foyer, et pendant tout le temps qu'il tire les feux le chauffeur est directement en face du péril.

Un chauffeur ne doit pas négliger son tube de niveau et dans aucun cas pousser les feux sans être assuré que les foyers sont couverts.

Une chaudière dont les feux sont violents et dont on a laissé les tôles arriver au rouge, est un instrument dangereux et il est impossible de remettre les choses en ordre sans courir des risques.

S'adressant aux propriétaires de chaudières, M. Fletcher leur recommande d'employer des soupapes de sûreté pour manque d'eau : celles-ci sont imposées dans les cahiers des charges de l'Association.

L'alimentation devra être introduite de manière à ne pas être projetée contre les foyers et dans tous les cas à l'arrière de l'autel.

Il estime que ce serait une très bonne chose que d'avoir un tube de niveau spécial, permettant, en cas de baisse de niveau, d'apprécier de combien les foyers sont découverts. Ceci serait utile au chauffeur pour qu'il puisse apprécier s'il est prudent pour lui de tirer les feux.

Conclusions de M. Fletcher. — « Ces expériences mettent claire-

Digitized by Google

ment à néant l'opinion généralement admise que le fait de projeter de l'eau froide sur des ciels de foyers portés au rouge produit *le dégagement instantané d'un immense volume de vapeur qui agit comme la poudre*, annulant l'effet de soupapes de sûreté de section convenable, et faisant éclater la chaudière dont les débris sont projetés à des distances considérables.

« Pourtant cette opinion a été répétée à satiété ; la foi qu'on lui avait vouée a eu de fâcheuses tendances pour les explications des explosions de chaudières, et égarant ainsi la recherche des véritables causes, a contribué à perpétuer le retour de ces désastres.

« Plus d'un pauvre chauffeur a été rendu responsable d'explosions dont il était parfaitement innocent.

« Il faut espérer que ces expériences seront utiles à tous en aidant à redresser certaines erreurs au sujet des explosions des chaudières.

« Il est malheureux que ces expériences n'aient pas été faites il y a cinquante ans, époque à laquelle on n'employait pas encore les hautes pressions et où les explosions de chaudières étant enveloppées de mystères, on trouvait plus commode, pour se tirer d'embarras, de faire retomber la responsabilité sur le chauffeur. »

Évidemment lorsque dans les expériences de M. Fletcher on projetait l'eau par minces filets sur les tôles portées au rouge, les gouttelettes au début rebondissaient sur le métal et tombaient dans la masse d'eau sous-jacente, ainsi que cela se passe dans l'expérience de laboratoire qui consiste à faire tomber des gouttes d'eau sur la convexité d'une capsule métallique portée en rouge. Le plan d'eau s'élevant peu à peu, la température de la tôle baissait progressivement et l'état sphéroïdal d'une masse d'eau importante ne saurait se produire ; du reste les travaux plus récents de M. Aimé Witz, que nous avons reproduits page 40, ont démontré l'impossibilité de l'existence de cet état dans les chaudières.

Théorie des explosions par surchauffe de l'espace de vapeur. — Une autre explication erronée des explosions avait été donnée par M. Perkins : elle était également admise d'une façon assez générale, car elle répondait à ce principe de production brusque

Digitized by Google

de grandes quantités de vapeur dont on avait besoin pour donner une explication des explosions violentes.

Imaginons que, par une cause quelconque, le niveau de l'eau baisse dans une chaudière ; les parties de la surface qui sont en contact d'un côté avec les produits de la combustion et de l'autre avec de la vapeur, prendront une température très élevée ; la vapeur s'échauffera bien au-dessus de la température du liquide ; la surface du liquide en contact avec la chaudière diminuant, la quantité de vapeur formée ira aussi en diminuant, malgré l'activité du foyer. Dans cet état, si l'on ouvre une soupape de sûreté ou un tuyau de dégagement, de manière à diminuer la pression intérieure, il se formera une grande quantité de vapeur aux dépens de la température de l'eau elle-même ; cette émission de vapeur, qui partira simultanément de tous les points de la masse liquide, produira une augmentation de volume analogue à celle des eaux gazeuses ou du vin de Champagne qu'on débouche; cette mousse pénétrant dans la chambre de vapeur à une haute température, il se formera dans un temps très court une grande quantité de vapeur ; la pression augmentera subitement, la soupape de sûreté se soulèvera, mais la quantité de vapeur qu'elle laissera écouler n'étant point suffisante, la chaudière éclatera.

Cette explication repose principalement sur la formation d'écumes suffisamment abondantes pour remplir en totalité ou du moins en grande partie l'espace de vapeur : elle suppose également que le niveau baissant et la pression diminuant, on ouvre soudainement de nouveaux dégagements de vapeur de façon à amener une dépression brusque. Ce dernier cas est loin de se présenter en pratique, mais en l'admettant en principe encore faut-il que le volume d'eau dont la mousse remplirait l'espace de vapeur, se trouvât dans les conditions nécessaires pour la formation de l'écume. En admettant encore que le phénomène se produisît tel qu'on vient de le décrire, la partie seule de cette mousse qui est en contact avec les parois surchauffées pourrait se vaporiser : ces parois du reste sont loin de pouvoir atteindre la température des tôles de coup de feu, car les carneaux qui les avoisinent ne forment en général que le deuxième ou le troisième

Digitized by Google

parcours des produits de la combustion ; la quantité de chaleur spécifique de ces parois ne saurait être suffisante pour provoquer une formation instantanée d'un grand volume de vapeur, et le fût-elle, elle ne saurait se propager dans cette espèce de ruche que par conductibilité des minces lamelles liquides, formant les parois des alvéoles. Ces objections ayant été soulevées, on se rabattit alors sur la surchauffe élevée de la vapeur dans laquelle l'eau était projetée : il suffit de jeter un coup d'œil aux tables donnant les chaleurs totales contenues dans la vapeur à des pressions même très élevées, pour voir qu'un très grand volume de vapeur ne saurait ainsi vaporiser qu'un volume d'eau insignifiant.

Théorie des explosions par mélanges détonants. — Ainsi toutes les explications des explosions basées sur l'abaissement du niveau, la surchauffe des tôles, et une augmentation de tension considérable due à une production instantanée d'un grand volume de vapeur, soit par alimentation intempestive, soit par dépression brusque, sont erronées et doivent être définitivement écartées. Il en est de même d'explications similaires : métal surchauffé ou porté au rouge sous une couche épaisse d'incrustation et rupture de ce fait d'une plaque de dépôts, qui en se détachant, mettrait l'eau en contact avec la tôle à très haute température.

« On a expliqué, dit Péclet dans son *Traité de la chaleur*, les explosions fulminantes par la détonation d'un mélange d'hydrogène et d'air ; l'hydrogène proviendrait de la décomposition de l'eau sur le métal incandescent, ou de celle des matières grasses entraînées par l'eau, et l'air arriverait par la pompe alimentaire, dont le tuyau d'aspiration ne plongerait pas dans l'eau, ou dont certains joints ne seraient pas parfaitement étanches ; l'inflammation du mélange détonant serait due au contact du métal incandescent, ou à une étincelle électrique résultant de l'électricité produite par la vaporisation. Cette dernière explication est bien difficile à admettre ; en effet, la quantité d'hydrogène qui se formerait ne pourrait donner un mélange explosif qu'avec l'oxygène introduit par la pompe à air ; cette quantité toujours excessivement faible, 40 litres au maximum

Digitized by Google

par mètre cube d'eau introduite, pourrait déterminer la combustion de 80 litres d'hydrogène : or, 120 litres de gaz explosifs mesurés sous la pression atmosphérique se trouveraient dilués dans la vapeur d'eau que peut produire un mètre cube de ce liquide, soit 1 600 000 litres mesurés aussi sous la pression atmosphérique; il est de toute impossibilité qu'un mélange pareil puisse faire explosion. D'ailleurs la production de l'électricité, fournissant des étincelles, qu'on observe lors de l'écoulement de la vapeur et qu'on a appliquée dans la machine électrique d'Armstrong, est exclusivement due au frottement de l'eau liquide entraînée sur les parois du tuyau de sortie, et ce n'est pas dans l'intérieur de la chaudière que l'étincelle pourrait se produire. Quoi qu'il en soit, cette dernière explication des explosions proposée il y a longtemps, a été reproduite par M. Jobard, qui la regarde comme pouvant seule rendre compte d'une explosion qui a eu lieu à Gand, il y a quelques années : la chaudière était froide, sans eau, ouverte, et la détonation eut lieu lorsqu'un ouvrier s'y introduisit avec une lampe pour la nettoyer. La formation de l'hydrogène dans les chaudières à vapeur a d'ailleurs été constatée, par M. Séguier, dans plusieurs circonstances : il a reconnu, dans une chaudière du faubourg Saint-Antoine, qu'il s'échappait de l'hydrogène avec la vapeur par la soupape de sûreté ; dans une machine à vapeur, il a été constaté que ce gaz sortait par la pompe à air. »

Ces mélanges détonants dans les chaudières sont constatés assez souvent depuis quelque temps, surtout lorsque le zinc métallique, ou la peinture aux sels de zinc, sont employés comme moyen préventif des corrosions intérieures. Mais leur inflammation ne se produit qu'à froid, lorsqu'on pénètre dans les générateurs pour une visite intérieure avec une flamme. Une certaine quantité d'hydrogène accumulée dans les parties hautes peut s'enflammer avec l'air extérieur qui pénètre, et il suffit, pour éviter cette détonation, d'ouvrir au préalable le robinet ou la soupape placée sur le point le plus haut de la chaudière. Dans la communication de M. Tornycroft à l'*Institution of Naval Architects,* session de printemps 1894, nous trouvons le passage suivant qui a trait à cette question :

Digitized by Google

« En visitant intérieurement les chaudières et les conduites de vapeur, nous avons fréquemment eu la fort désagréable occasion de constater la présence de gaz détonants : je crois que la formation de ceux-ci est due aux grandes surfaces de zinc. J'appuie ma remarque sur ce fait que ce n'est que depuis que les tubes sont galvanisés que nous le constatons, et aussi sur ce que le zinc est rongé.

« Dans un cas, pendant la forte gelée de cet hiver, un torpilleur est resté cinq jours sur feux dormants. On s'aperçut d'une fuite dans le tuyau d'échappement d'une machine et la présence d'un gaz combustible ne fut découverte que par son inflammation accidentelle, lorsqu'il brûla pendant trois ou quatre minutes, avec une longueur de flamme d'environ 900 millimètres, au début colorée en bleu, pour passer ensuite à la flamme éclairante du gaz de houille. »

Théorie des explosions par surchauffe de l'eau. — La théorie de la surchauffe de l'eau a été ensuite présentée, d'abord par Tyndall, ensuite par le commandant Trèves. Dans son ouvrage, *La Chaleur, mode de mouvement*, Tyndall esquissait ainsi cette théorie :

« Il est vraiment remarquable qu'un grand nombre de locomotives ont fait explosion en quittant le hangar où elles étaient restées quelque temps en repos. Le nombre d'explosions survenues juste au moment où le mécanicien ouvrait son robinet de vapeur est tout à fait surprenant. Or supposons que l'eau de la locomotive a bouilli assez longtemps pour que tout l'air qu'elle contenait ait été expulsé. Cette eau alors possédera à un degré plus ou moins élevé cette puissance de cohésion sur laquelle j'ai attiré votre attention. On conçoit aussi que, pendant que la locomotive est restée au repos, attendant l'ordre du départ, la chaleur s'est accumulée en excès dans l'eau du générateur ; or cet approvisionnement excessif de chaleur une fois admis, quand le mécanicien ouvrira son robinet de vapeur, il déterminera mécaniquement la rupture de la cohésion, et il y aura génération instantanée de vapeur explosive. Je ne prétends pas affirmer qu'il en soit ainsi ; mais qui pourrait dire que cela n'est pas ? Nous

Digitized by Google

sommes certainement en présence d'un agent réel, très capable, si l'on invoque sa puissance, de produire les plus terribles effets qu'on lui a attribués. »

Cette théorie a été reprise par le commandant Trèves et développée, en s'appuyant sur les phénomènes de surchauffe que nous avons examinés aux pages 23 et suivantes, dans deux notes communiquées à l'Académie des sciences, 2e semestre 1882 et 1er semestre 1883.

La théorie de la surchauffe est assez séduisante pour l'explication des explosions violentes : elle repose sur une loi physique nettement déterminée et sur l'impossibilité de provoquer l'ébullition au sein d'un liquide sans la présence de l'air. Si, lorsque l'ébullition a été retardée, on introduit dans le générateur de l'eau d'alimentation amenant de l'air, un dégagement violent de vapeur peut se produire, car la quantité de chaleur emmagasinée dans la masse d'eau est considérable ; si la production de vapeur se fait à la partie inférieure de la masse d'eau, celle-ci peut être soulevée brusquement comme nous l'avons vu aux pages 58 et suivantes et venir frapper avec violence contre les parois supérieures du générateur.

Le remède proposé était une admission d'air, nécessaire pour empêcher la surchauffe.

L'émotion causée par les communications du commandant Trèves, fut assez grande pour que le ministre chargeât la Commission centrale des machines à vapeur d'étudier la question et en dresser un rapport dont le texte a été publié dans le volume 5 des *Annales des Mines* en 1884. Les conclusions de ce rapport sont que la surchauffe, difficile à réaliser dans les appareils de laboratoire, ne pouvait se produire dans les générateurs de vapeur. Des recherches analogues furent également entreprises officiellement en Angleterre par le Boiler Committee, dont les conclusions furent les mêmes ; l'introduction de l'air, d'après les indications du commandant Trèves, fut même réalisée sur plusieurs chaudières, et dut être abandonnée, les générateurs se corrodant intérieurement avec une rapidité désastreuse.

En discutant cette théorie, il est utile de remarquer que l'étanchéité des chaudières est loin d'être parfaite d'une façon géné-

Digitized by Google

rale, et une certaine quantité d'air s'y introduit aux arrêts par les interstices où se manifestent les fuites en fonctionnement.

L'eau d'alimentation est dans tous les cas chargée d'air, et l'oxydation du métal laisserait subsister l'azote dont la présence provoquerait toujours l'ébullition.

Origine des explosions. — Il faut donc rechercher l'origine d'une explosion, non pas dans l'eau et sa vapeur, qui en produisent les effets, mais dans une diminution de résistance des parties qui composent la chaudière, et ne leur permet plus de s'opposer à des pressions, parfois même inférieures de beaucoup à celles du fonctionnement normal.

Si nous prenons comme unité la résistance à la rupture d'une tôle à la température ordinaire, cette résistance ira en augmentant jusque vers 180°, et sa valeur pour des températures plus élevées est donnée par le tableau suivant, dressé d'après des expériences très complètes réalisées en Amérique par l'Institut Franklin.

271°	0,9262	554°	0,5522
350	0,8845	599	0,4486
408	0,8411	642	0,3648
440	0,7990	708	0,3010
500	0,6676		

Si la surchauffe d'une des parties d'un générateur venait à se produire, la diminution de résistance décroîtrait donc très rapidement.

Si la surchauffe a lieu à un assemblage, la résistance de celui-ci est, d'après Fairbairn, de 0,56 ou 0,70 de celle de la pleine tôle, suivant que la rivure est simple ou double : à la température de 600° par exemple, les résistances d'une simple rivure sera $0,56 \times 0,44 = 0,25$ et celle d'une rivure double $0,70 \times 0,44 = 0,39$ de la résistance de la pleine tôle à la température normale. Une légère surélévation de la température peut alors amener la rupture de l'assemblage, si nous supposons qu'aucun autre effort ne puisse s'exercer, et que l'épaisseur de la tôle soit toujours celle d'origine.

Mais les épaisseurs des tôles diminuent par les usures inté-

Digitized by Google

rieures et extérieures, et de plus, ainsi que nous l'avons examiné pages 328 et suivantes, les efforts de traction dus aux inégalités de dilatation provoquées par les différences de températures, atteignent des valeurs considérables. Ces causes à elles seules sont suffisantes pour motiver un désastre, et c'est indiscutablement à la dernière qu'il faut imputer les explosions qui se produisent lors des reprises de service, pendant la mise en pression, et parfois même à l'arrêt, pendant le refroidissement, les feux éteints.

La mise à sec des tôles de coup de feu par abaissement du plan de niveau d'eau ou par une des nombreuses causes que nous avons examinées, ne provoque généralement qu'une avarie locale, une bosse qui peut se déchirer et donner passage à un torrent d'eau et de vapeur, mortel le plus souvent pour le personnel de service.

Effets de réaction. — Nous avons vu que dans des conditions particulières, la formation d'un matelas de vapeur sur les tôles de coup de feu amenait le soulèvement de la masse d'eau : celle-ci lancée contre les parois de la partie supérieure du générateur y produirait un choc violent qui en amènerait la rupture. Cette action particulière appelée couramment *marteau d'eau* en Angleterre, par analogie avec l'appareil de physique expérimentale, se produit particulièrement dans les conduites de vapeur. C'est à cette action qu'a été attribué l'accident de « l'Elbe » en octobre 1807, tuant neuf personnes d'emblée, et l'horrible désastre qui vient de se produire en février 1894 sur le « Brandenburg » et qui a causé trente-neuf morts du coup, et neuf blessés dont deux ont succombé aux suites des brulûres, c'est-à-dire 41 morts et 7 blessés. Ce dernier accident s'est produit au moment où le navire passait de l'allure lente à celle à tirage forcé ; les entraînements d'eau de la chaudière s'étant probablement accumulés dans les conduites, lors du changement d'allure une nouvelle quantité d'eau envoyée par le générateur a pu obstruer la conduite et, lancée par la vapeur, a frappé avec violence la paroi qui s'est ouverte. De semblables accidents se produisent souvent et mènent naturellement à l'étude de l'action exercée par une masse d'eau considérable,

Digitized by Google

projetée violemment contre les parois des générateurs. Il est indiscutable que ce phénomène se produit dans les chaudières assez fréquemment, et qu'il doit être la cause de nombreux acci-

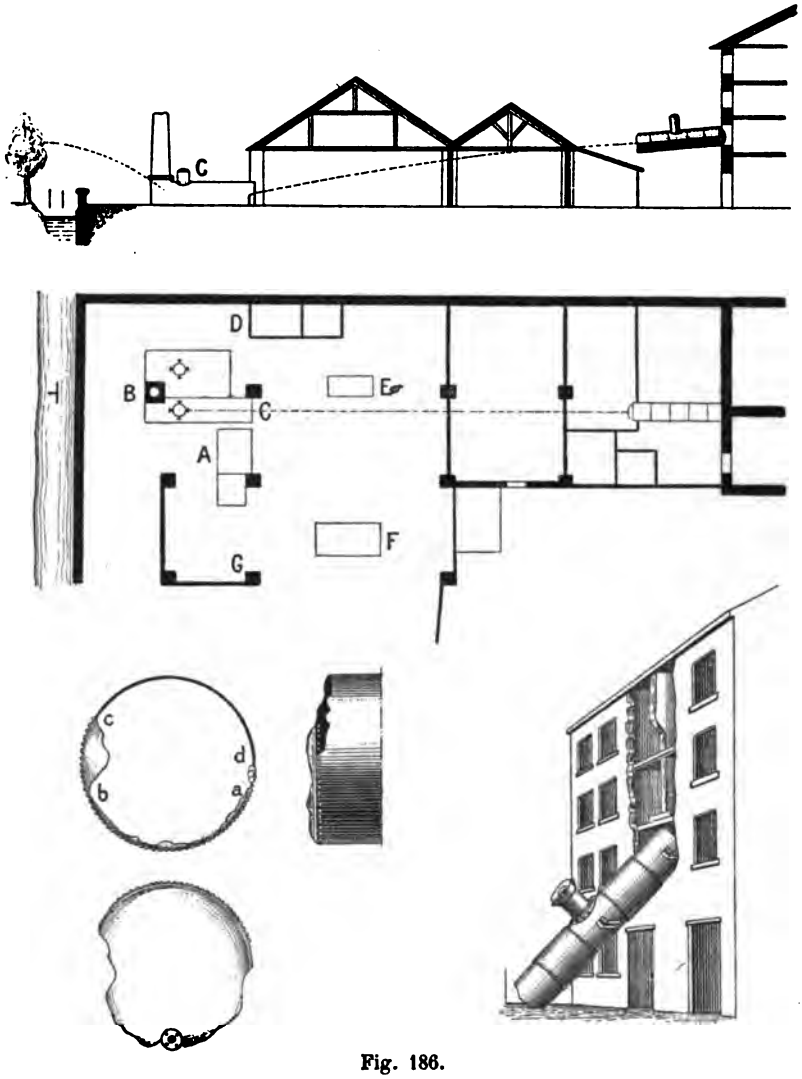


Fig. 186.

dents, mais nous pensons que ses effets se font sentir par réaction plutôt que par le choc direct. Les tôles ou leurs assemblages étant soumis à un effort voisin de leur limite de résistance, la réaction produite par la détente d'un certain

Digitized by Google

volume de vapeur, en-dessous du plan de niveau d'eau, peut se transmettre, à cause de la charge d'eau, sur une surface considérable et avoir ainsi un effet analogue à une charge explosive sur un rocher sous-marin.

A l'appui de ces effets de réaction, il nous suffira de citer l'explosion suivante, extraite du catalogue de l'Exposition collective en 1889 des Associations françaises de propriétaires d'Appareils à vapeur (fig. 186), et celle de l'usine Cartier à Aubagne, fig. 203.

« La chaudière, à un corps cylindrique simple, avait été timbrée à 6 kilogrammes le 14 juin 1880 ; sa longueur était $7^m,25$, son diamètre $2^m,30$. Épaisseur des flancs : $11^{mm},5$. Épaisseur des fonds emboutis : 12 millimètres. Volume d'eau au niveau normal : 6,500 litres.

« *Circonstances de l'explosion.* — Le fond d'arrière s'est détaché comme l'indique la figure ; il a été lancé vers l'arrière avec l'eau contenue dans la chaudière [1] et l'arrière du fourneau. La cheminée B a été rasée, le fond est venu frapper un arbre en H avant de tomber dans le bief. La chaudière a été lancée en sens inverse vers l'avant ; elle s'est arrêtée à 40 mètres de distance en défonçant la façade d'une maison qu'elle aurait certainement traversée si elle n'avait rencontré un mur de refend. »

Accidents spéciaux aux chaudières multitubulaires. — Les causes d'explosions ou d'accidents que nous venons d'examiner sont communes à tous les types de générateurs, mais il est nécessaire ici d'examiner à ce point de vue spécial les chaudières à tubes d'eau, improprement dénommées inexplosibles, car elles ont fait naître de nouvelles sources de danger ; depuis que leur emploi s'est rapidement développé, le nombre d'accidents s'est malheureusement accru dans un rapport plus considérable que celui des appareils en service. Si les dégâts matériels avec cette catégorie d'appareils ne sont pas importants, en revanche le nombre des victimes dans le personnel de service a pris des proportions inquiétantes.

[1] C'est au contraire parce que l'eau contenue dans la chaudière *y est restée*, que l'effet de réaction s'est produit.

Digitized by Google

On a donné à ce type l'appellation d'inexplosible parce qu'il n'est pas probable que tous les tubes viennent à se rompre en même temps, et que la déchirure d'un tube de coup de feu n'intéresse généralement que ce tube seulement.

Il faut observer qu'en cas de rupture sur un seul point, la chaudière se viderait nécessairement par l'ouverture produite, et quelque réduit que soit le volume de l'eau qu'elle contient, si la chaudière se trouve dans un espace limité, il en résulte des brûlures souvent mortelles, par suite de la vaporisation instantanée d'une partie de ce volume d'eau, rendue d'autant plus effective que le poids de la chaudière est plus considérable par rapport à celui de l'eau qu'elle renferme.

D'ailleurs, dans ces appareils, le volume d'eau en général n'est pas aussi réduit qu'on pensait pouvoir le faire à l'origine. On y a ajouté des bouilleurs, des réservoirs d'eau et de vapeur, afin de se rapprocher des conditions des autres chaudières.

Dans les générateurs à tubes d'eau les dangers principaux résident dans les nombreux bouchons de nettoyage non autoclaves, ainsi que nous l'avons examiné en discutant ce type d'appareil, et dans l'absence d'eau dans les tubes de coup de feu. Ceux-ci sont souvent à l'état de surchauffe et s'il existe le moindre défaut à la soudure ou ailleurs, le tube s'ouvre sur une certaine longueur au point de moindre résistance, comme le montre la figure 187.

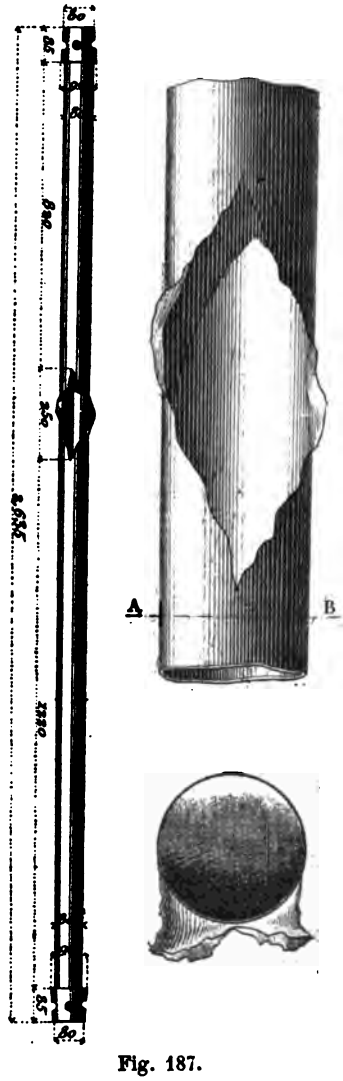


Fig. 187.

Digitized by Google

Une autre cause d'accidents assez fréquents, c'est le déboîtage des tubes. Nous avons vu page 335 que lorsqu'un tube dudgeonné dans une plaque est soumis à une chauffe et à un refroidissement successifs, il tend à reprendre son diamètre primitif et que la contraction observée dans les expériences avait été de 1/40 du diamètre. Il n'est donc pas surprenant que l'effet du mandrinage soit complètement annulé par l'effet des surchauffes auxquelles ces tubes sont inévitablement exposés, et que l'adhérence venant totalement à manquer à un moment donné, la pression chasse la boîte ou le collecteur du tube. Cet accident qui s'est fréquemment répété sur les chaudières multitubulaires à tubes mandrinés, a été attribué aux inégalités de dilatation des différents tubes d'une série, inégalement chauffés et réunissant rigidement deux collecteurs : on a imposé comme remède l'évasement de la partie du tube dépassant la partie dudgeonnée (fig. 188), remède insuffisant, car il ne supprime pas la cause : nous avons eu personnellement l'occasion de constater le déboîtage des tubes à bord ainsi évasé. Le seul remède efficace, d'après les expériences de MM. Wehrenfennig (p. 332) et Stromeyer (p. 335) consiste dans la compression préalable à froid du tube : en supposant qu'on ne puisse empêcher la surchauffe, l'effet de celle-ci serait alors d'augmenter l'adhérence au lieu de la détruire.

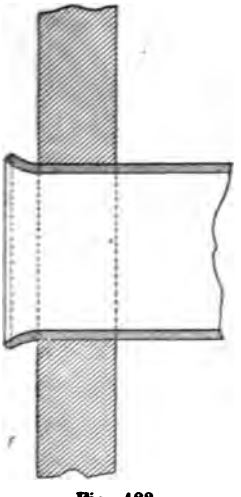


Fig. 188.

L'horrible accident qui s'est produit sur le torpilleur *le Sarrazin*, en janvier 1894, mérite ici une mention spéciale, car il démontre bien le vice radical qui existe dans les générateurs de ce système. Cet accident a été en effet le quatrième d'une série désastreuse qui a eu lieu sur le même bateau et sur la même chaudière, à laquelle on s'est obstiné à apporter des modifications successives sans vouloir approfondir la cause de ces explosions réitérées.

Le type de chaudière est représenté schématiquement à la figure 116 : le faisceau tubulaire se compose de deux séries de

Digitized by Google

tubes, l'une concentrique à l'autre : l'espace annulaire entre les tubes contient l'eau et la vapeur : la surface de chauffe est formée par les surfaces extérieures et intérieures des parois de l'espace annulaire, les produits de la combustion parcourant en deuxième retour les tubes de fumée intérieurs.

Trois accidents ont eu lieu à Bordeaux : les deux de début ont été occasionnés par la rupture des tubes du bas : le premier a occasionné des blessures graves à plusieurs hommes, le deuxième, par un hasard providentiel, n'a pas fait de victimes. A la suite de ces accidents, l'administration de la marine exigea le remplacement des tubes des deux rangées du bas par des tubes uniques sans retour intérieur : l'accident était attribué au dégarnissage d'eau par suite de l'exiguïté de l'espace annulaire, et l'on pensait y remédier par l'emploi de tubes dont la section pleine pouvait être occupée par l'eau. Le troisième accident a occasionné la mort de trois hommes par rupture d'un de ces tubes de coup de feu à section entièrement libre. Loin de rechercher la cause qui permettait ainsi la déchirure des tubes, on ne pensa qu'à en modifier la forme : on les remplaça par des tubes de petit diamètre, ondulés sur leur longueur : quatrième accident à Rochefort qui fit sept victimes.

Cette fois, l'accident se produisit aux tubes de la quatrième rangée supérieure du faisceau : en se reportant aux expériences du chapitre XIV, on verra que les tubes de petit diamètre au coup de feu, produisaient une circulation effective de l'eau ; ceux des rangées supérieures étaient dégarnis d'eau par le fait même de cette circulation ; on a constaté en effet au démontage que *plusieurs* tubes des troisième et quatrième rangées *étaient boursouflés et allaient se fendre.*

Tous ces accidents se produisant à la suite de chaque modification prouvent le défaut capital des chaudières de ce type (circulation vicieuse ou absente) et le danger permanent que fait courir leur emploi dans leurs conditions actuelles d'établissement.

Nécessité de la circulation de l'eau. — En résumé, sauf l'usure des tôles par corrosions intérieures et extérieures, et les vices cachés de matières, on peut affirmer que la cause principale des

Digitized by Google

accidents de chaudières réside surtout dans la mauvaise circulation de l'eau, qui produit ainsi les inégalités de température et les efforts énormes dus aux différences de dilatation, la formation des matelas de vapeur et la mise à sec des parois de coup de feu, ce qui entraîne leur surchauffe. La circulation libre et continue de l'eau, par quelque moyen qu'elle soit obtenue, peut seule faire disparaître ces derniers inconvénients et les conséquences funestes qui en découlent.

Digitized by Google

CHAPITRE XVIII[1]

THÉORIE SUR LES EFFETS DYNAMIQUES DES EXPLOSIONS

Contradictions dans les effets dynamiques. — Lorsque l'on compare entre elles diverses explosions, on est déconcerté par la contradiction des résultats produits. On admet en principe que les effets dynamiques doivent être proportionnels à la pression et au volume d'eau contenu dans la chaudière au moment de l'explosion, et l'on constate de véritables désastres occasionnés par des générateurs à volume relativement faible, n'ayant présenté à l'origine qu'une section de rupture réduite, tandis que d'énormes chaudières à grand volume crèvent en découvrant des orifices d'écoulement de plusieurs décimètres carrés et ne produisent que des dégâts insignifiants.

C'est l'explication de ces différences que j'ai cherché à déduire de l'étude d'un grand nombre d'explosions.

Je viens de dire qu'on ne s'était encore préoccupé que de la pression et du volume. Les diverses catégories établies par le règlement sont en effet calculées en fonction de ces deux facteurs exclusivement.

On est unanime à dire qu'« en cas de manque absolu d'eau il ne peut y avoir de grands effets dynamiques ». *Comme conséquence, toute explosion désastreuse exclut le manque absolu d'eau.*

C'est en vertu de ces principes que beaucoup d'ingénieurs sont disposés à croire *a priori* :

1° Que les explosions à faibles dégâts sont un indice certain de manque d'eau ;

[1] Ce chapitre est tiré d'une conférence donnée à la Société scientifique de Marseille par M. Paul Dubiau, Directeur de l'Association des Propriétaires d'Appareils à vapeur du Sud-Est.

Digitized by Google

2° Que les explosions de chaudières contenant de très grands volumes d'eau doivent être nécessairement désastreuses.

Statistiques officielles et déclarations omises. — Or, la pratique démontre fréquemment que ces deux dernières propositions sont également erronées.

La publication des statistiques concernant les explosions n'étant pas étrangère à la formation de ces erreurs, il n'est pas sans intérêt d'examiner les bases des relevés officiels.

En cas d'accident, le règlement est formel (art. 38) :

Le chef de l'établissement est tenu de prévenir immédiatement le chef de la police locale et l'ingénieur des mines s'il y a des tués ou des blessés, ce dernier seulement si l'accident n'a occasionné ni mort ni blessure.

Je m'en voudrais d'ajouter une obligation nouvelle aux prescriptions déjà si nombreuses faites aux industriels, mais il faut reconnaître qu'au point de vue de l'exactitude de ce genre d'informations la mesure est incomplète, car la déclaration des avaries n'est pas demandée. Il en résulte que la plupart des explosions qui n'entraînent que des dégâts rapidement réparables sont considérées par les industriels comme de simples avaries et ne concourent pas à l'établissement des statistiques.

Or, le nombre en est considérable, car l'explosion à grands effets dynamiques est l'exception.

Il suit de là que les déductions à tirer de ces publications officielles sont complètement faussées.

Des idées préconçues naissent ainsi de laborieuses compilations, d'études réfléchies, mais à distance respectueuse, et donnent lieu à des opinions d'autant plus absolues qu'elles s'appuient sur des documents estampillés.

Expertises. — Disons en outre que les enseignements scientifiques à tirer de chaque cas ne ressortent pas toujours clairement des rapports d'expertise.

Chaque déclaration d'accident fait l'objet d'un rapport circonstancié de l'ingénieur des mines, les conclusions de ces rapports sont soumises à la commission centrale des machines à vapeur.

Digitized by Google

Lorsqu'il y a mort d'homme, le parquet fait souvent procéder à une enquête par un ou plusieurs experts de son choix. Or tous ceux qui ont eu à faire des recherches de cette nature savent combien, en dehors des constatations matérielles, il est difficile d'établir la vérité par des témoignages.

Il ne faut pas perdre de vue que ces sinistres peuvent entraîner des pénalités.

Sous l'impression que laisse aux survivants la vue d'une catastrophe les souvenirs ne sont plus précis.

Il faut tenir compte également de l'intérêt personnel des uns qui craignent de se compromettre, des sentiments de solidarité des autres. De là des déclarations contradictoires au milieu desquelles l'expert est naturellement porté à choisir celles qui concordent le mieux avec les faits matériels et aussi avec la conviction qu'il s'est déjà faite d'après l'examen des lieux et des pièces qu'il a sous les yeux.

Or des hommes techniques, qui n'hésiteraient pas, au point de vue scientifique, à émettre d'intéressantes hypothèses, se font généralement un cas de conscience de les passer sous silence si elles doivent servir de base à une accusation.

Bien que ces considérations nuisent à l'intérêt scientifique que pourrait présenter ce genre d'études, il serait inhumain de les déplorer trop amèrement.

Regrettons seulement une fois de plus que les explosions bénignes dont les comptes rendus ne comporteraient aucun ménagement, soient précisément celles dont les rapports nous font le plus défaut.

Mémoire de M. Périssé. — En 1886, deux explosions, présentant entre elles de nombreux caractères de similitude, se produisaient à Paris, l'une à la raffinerie Say, l'autre à la raffinerie Lebaudy. M. Périssé, membre de la commission centrale des appareils à vapeur, eut l'occasion d'étudier toutes les circonstances de ces deux accidents en qualité de délégué aux expertises judiciaires qui furent ordonnées.

Ses recherches et ses observations personnelles ont fait l'objet d'un mémoire dont les conclusions sont applicables aux explosions en général.

Digitized by Google

Ce travail, communiqué à la Société des ingénieurs civils de France, y a été longuement discuté (séances des 4 et 10 mai 1888).

Bien que la question ait été traitée par l'auteur au double point de vue des causes et des effets, la discussion a plutôt porté sur la première partie.

La théorie relative aux effets dynamiques semble avoir été acceptée sans discussion ; elle n'en présente pas moins un haut intérêt, car elle éclaire la question d'un jour nouveau.

Cette partie a appelé toute notre attention, car les deux cas qui ont servi de base sont précisément considérés, — à tort d'ailleurs — comme exceptionnels. Il s'agissait en effet de chaudières à très grand volume d'eau : 20 000 litres : sous une pression moyenne de 5 kilos, découvrant des orifices d'écoulement de 12 décimètres dans un cas, de 25 décimètres carrés dans l'autre, et ne provoquant l'une et l'autre que des dégâts matériels insignifiants.

M. Périssé rappelle, d'après M. Hirsch, que les effets dynamiques les plus puissants n'ont rien de surnaturel et s'expliquent simplement par la transformation en travail de l'énergie accumulée dans l'eau à une température supérieure à 100°. Le calcul du travail produit par un kilogramme d'eau sous pression passant adiabatiquement à la température de 100° donne en effet des chiffres considérables.

C'est ainsi qu'à des pressions variant de 2 à 5 kilos, chaque mètre cube d'eau est susceptible de développer de 2 à 4 millions de kilogrammètres.

On s'explique donc d'extraordinaires résultats lorsque le travail de détente se produit en un temps excessivement court.

M. Périssé fait observer que l'eau s'échappant par la partie inférieure d'un générateur ne se vaporise qu'à l'extérieur et qu'en raison du libre écoulement du mélange d'eau et de vapeur, il ne se produit plus aucun travail.

Partant de cette hypothèse, il établit que le seul effort qui réagit sur la chaudière du fait de l'écoulement doit se calculer d'après le théorème des quantités de mouvement.

Et il établit la formule :

$$F = 2SP.$$

dans laquelle F exprime en kilos l'effort de réaction, passant par

Digitized by Google

l'axe de la blessure et agissant en sens directement inverse de l'écoulement sur le générateur pour le déplacer, S la section d'écoulement en centimètres carrés, P la pression effective du générateur.

Faible influence du volume d'eau. — Il faut remarquer que dans ce dernier cas le volume de l'eau contenu dans la chaudière n'intervient nullement, au point de vue des effets mécaniques; le plus grand volume donnera simplement au phénomène une plus longue durée.

A l'appui des deux exemples cités par M. Périssé, M. Schmidt, ingénieur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur d'Amiens, signale le décollement d'une tête en fonte de bouilleur brusquement arrachée sous une pression de 5 kilos, laissant écouler par un orifice béant de $40^{dmc},15$ un torrent de 13 mètres cubes d'eau bouillante sans que la chaudière ni les maçonneries aient subi le moindre déplacement.

D'après la deuxième formule de M. Périssé, la résistance horizontale opposée par le poids du générateur et l'adhérence des maçonneries aurait dû être

$$2 \times 4015 \times 5 = 40^{k},150$$

J'ignore si le fond arrière du bouilleur était buté contre une solide maçonnerie, ce qui expliquerait la résistance obtenue. En tout cas, si nous reportons l'effort sur les rivets des deux cuissards, nous trouvons qu'ils étaient soumis à un effort de cisaillement d'à peine 3 kilos par millimètre carré de section.

Il n'est pas sans intérêt de rapprocher de ce cas un exemple qui m'a été signalé récemment.

La cause originelle est la même : arrachement d'une tête de bouilleur, mais les effets ont été tout différents; les cuissards ont été brisés et le bouilleur projeté en arrière a traversé un mur.

Ces résultats contradictoires trouveraient probablement une explication dans les différences de construction. Le dernier fait est très ancien; il s'est produit à une époque où les cuissards étaient constitués par l'emboîtement de deux pièces en fonte.

Digitized by Google

Conclusions de M. Vinçotte. — De toutes les théories émises, je conclus avec M. Vinçotte, directeur de l'Association belge des propriétaires d'appareils à vapeur :

« Que l'origine de toute explosion de chaudière est due à la « pression progressive que la production normale de la vapeur « fait subir à l'appareil et que la rupture commence au point où « les efforts de la pression dépassent la résistance. »

Rupture originelle. — Dans la plupart des cas, la rupture originelle est d'abord limitée à la partie la plus affaiblie, elle découvre un orifice d'écoulement de forme et de section déterminées. Ce premier phénomène est brusque ou tout au moins se produit en un temps tout à fait inappréciable; si son effet immédiat est de réduire la pression, il doit forcément être suivi d'un temps d'arrêt.

Nous allons envisager toutes les hypothèses qui peuvent se présenter à ce moment.

Formation de la vapeur. — Mais auparavant, rappelons succinctement les principes thermiques de l'eau et de la vapeur.

La chaleur contenue dans un poids d'eau p — exprimé en kilogrammes — est à la température de t degrés centigrades

$$p \times t \text{ calories.}$$

Le même poids de vapeur à la même température contient

$$p \times (606{,}5 + 0{,}305\ t) \text{ calories.}$$

Cette dernière valeur est, à la pression moyenne de marche des générateurs, quatre fois plus élevée que la première.

On ne connaît pas un état physique ou calorifique intermédiaire.

On est obligé d'admettre cependant que chaque molécule d'eau doit acquérir une température un peu supérieure à celle de la pression correspondante et que la formation de la vapeur résulte de ces suppléments de chaleur. Cet excès de température n'est pas sensible aux appareils thermométriques dont nous disposons, soit parce qu'il est extrêmement faible, soit parce que la rapidité avec laquelle se produit l'échange de chaleur entre la température normale et la température maximum échappe à tout contrôle.

Digitized by Google

Dans ce dernier cas le thermomètre se trouverait d'ailleurs dans une température moyenne, ne donnant que la moitié d'un écart déjà inappréciable.

On explique donc le passage immédiat de la chaleur de vaporisation en supposant qu'une certaine quantité de molécules d'eau cèdent à l'une d'entre elles leur surcroît de chaleur pour la libérer à l'état de vapeur.

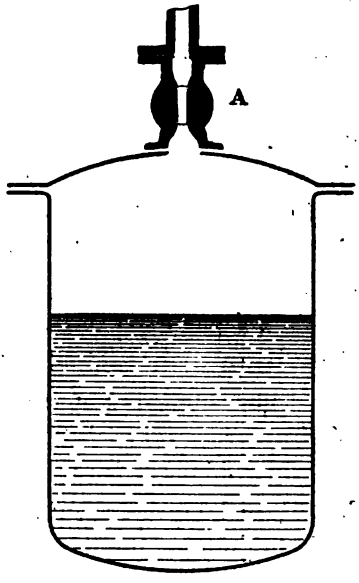


Fig. 189.

Lorsque la vapeur se produit naturellement sans le secours d'une source spéciale de chaleur, c'est-à-dire à la température ambiante, on dit qu'il y a évaporation ; celle-ci se fait exclusivement par la surface du liquide.

Dans la vaporisation provoquée par un foyer, au contraire, la vapeur se forme au contact des surfaces chauffées, et à la surface libre du liquide.

Enfin, il est un dernier cas où la vapeur peut se produire dans toute la masse liquide en vertu de la théorie de l'échange de chaleur de molécule à molécule.

Supposons un récipient (fig. 189) contenant de la vapeur sous pression et de l'eau à la température correspondante, ne recevant ni ne perdant de chaleur extérieurement.

Il est certain que si nous ouvrons une prise A, l'abaissement de pression que nous allons supposer progressif au début va déterminer la formation d'une quantité de vapeur, à la surface d'abord, et, si la chute de pression est sensible, dans la masse d'eau.

Nous sommes fondés à croire cependant que la plus grande partie de cette vapeur va être émise presque exclusivement par le plan d'eau.

La formation des bulles dans les parties noyées aurait à vaincre une résistance latérale qui peut être considérable, l'inertie du

Digitized by Google

liquide s'opposerait à l'augmentation de volume qui devrait en résulter, ou tout au moins provoquerait des projections d'eau à la partie supérieure.

La vapeur émise par la surface au contraire n'a aucune résistance à vaincre et rien ne s'opposera en cas de chute brusque de pression à ce que sa formation soit instantanée.

Rupture réduite en regard de la vapeur. — Reprenons maintenant l'hypothèse précédente de la déchirure brusque d'une chaudière découvrant une section limitée, la rupture se produisant dans la chambre de vapeur.

Si la section d'écoulement du fluide est réduite, la pression ne s'abaisse que progressivement et la formation de vapeur nouvelle est proportionnelle à la chute de la pression.

Il n'y a pas d'explosion, à proprement parler. C'est le cas de l'ouverture d'un robinet d'évacuation de vapeur, lorsque, pour une cause quelconque, on veut faire tomber la pression d'un générateur en lui maintenant son eau. Il s'écoulera entre l'ouverture du robinet et le moment où la température de l'eau arrivera à 100° un temps plus ou moins long, suivant le volume contenu, mais toujours nettement appréciable.

Rupture étendue en regard de la vapeur. — La section d'écoulement est telle au contraire qu'elle peut déterminer en un temps extrêmement court une chute sensible de pression (fig. 190).

L'équilibre entre la température de l'eau et la pression est brusquement rompu. Il ne me paraît pas douteux que cette condition va solliciter une production instantanée de vapeur et que les points de plus grande production vont se trouver au plan d'eau.

N'est-il pas admissible enfin que cette vaporisation subite est de nature à produire un choc agissant dans le sens de la pression et s'ajoutant à ses efforts ?

On se rend mal compte de la possibilité d'un choc dans un milieu élastique, car on se reporte involontairement aux réservoirs d'air créés dans les pompes en vue d'en régulariser le débit.

Digitized by Google

Rien n'est plus exact cependant. Dans la pratique des canalisations hydrauliques on constate souvent que les chambres d'air sont extrêmement nuisibles. Des appareils d'évacuation d'air dénommés *ventouses* ont même été créés pour éviter ces inconvénients.

J'ai, personnellement, été témoin d'un fait très probant : des colonnes de distribution avaient été construites de telle sorte que

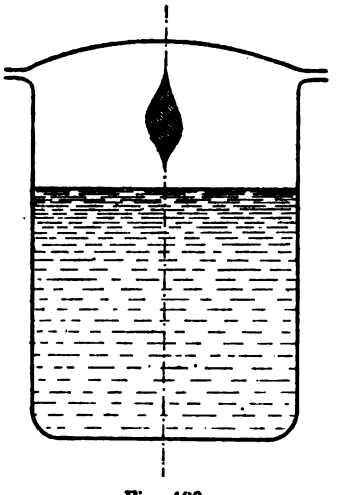


Fig. 190.

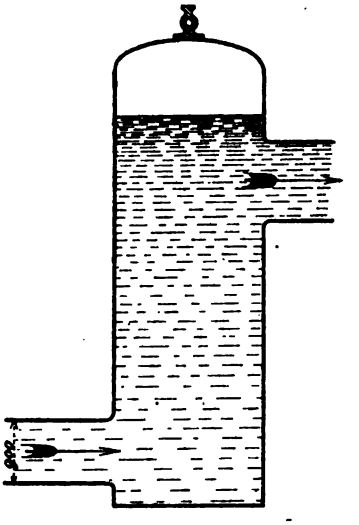


Fig. 191.

leurs sommets devaient former cloche d'air. Des avaries nombreuses, dont quelques-unes très graves, se sont reproduites jusqu'au moment où l'établissement de robinets de purge a permis d'évacuer entièrement l'air accumulé dans les cloches (fig. 191).

L'hypothèse d'un choc produit par la vaporisation instantanée d'une certaine quantité d'eau me paraît donc fondée. Remarquons en outre qu'à dépression égale produite par la rupture originelle, la quantité de vapeur formée sera d'autant plus instantanée que la nappe d'eau brusquement vaporisée sera plus étendue.

Nous sommes donc en présence d'une quantité anormale de vapeur susceptible de développer un travail. Mais toute production de travail suppose une résistance à vaincre. La résistance est ici constituée par les parois de la chaudière, déjà affaiblies par une première rupture.

Digitized by Google

Je crois donc que nous réalisons ainsi les cas de véritables explosions ayant tous les caractères d'une détonation intérieure capable de produire les plus grands effets de destruction.

Rupture complète dans la vapeur. — Poursuivant la même hypothèse, au point de vue de la résistance, supposons qu'au lieu d'une rupture partielle à la partie supérieure, ce soit le couvercle tout entier du réservoir considéré qui se soit brusquement détaché (fig. 192). La quantité de vapeur produite instantanément sera probablement plus considérable que dans le cas

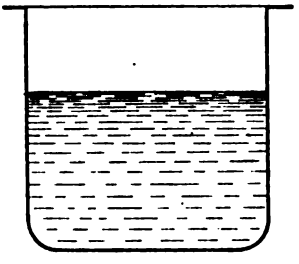


Fig. 192.

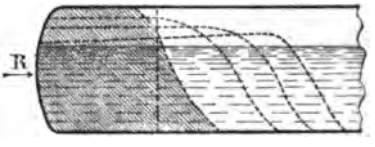


Fig. 193.

précédent, car la différence subite des pressions sera plus grande ; mais il est possible que cette brusque vaporisation ne produise pas ici grand effet dynamique. La suppression du couvercle enlève en effet au récipient la plus grande partie de la résistance qui est indispensable au développement du travail, et la vapeur se détendra presque librement dans l'atmosphère.

C'est un cas que nous avons observé ; les dégâts se sont bornés à la projection du fond supérieur.

Un cylindre horizontal (fig 193) à moitié rempli d'eau qui ne se trouverait pas en contact avec une résistance suffisante R serait projeté en sens inverse et l'eau serait refoulée dans la même direction occupant toute la section transversale du récipient.

Rupture immergée réduite. — La rupture se produit dans la partie immergée. Nous allons admettre pour l'examen de ce cas les mêmes circonstances que précédemment.

Si la section de rupture est assez réduite pour ne donner lieu

Digitized by Google

qu'à une production progressive de vapeur, celle-ci remplira l'espace laissé libre par l'écoulement de l'eau. Comme comparaison c'est la vidange d'une chaudière par l'ouverture du robinet d'extraction (fig. 194).

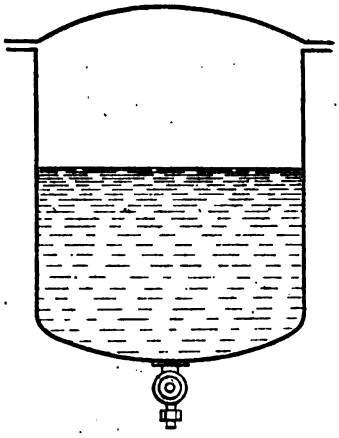


Fig. 194.

Pas de production anormale de vapeur, pas de travail, pas d'explosion.

Rupture immergée étendue. — La section de la déchirure originelle est suffisante pour amener une chute brusque de pression. Remarquons que pour produire ce dernier résultat, la section d'écoulement devra être bien supérieure à celle que nous avions supposée précédemment dans la chambre de vapeur pour produire le même phénomène de dépression.

La vitesse d'écoulement des liquides est en effet bien inférieure à celle des gaz ; en supposant la pression à 5 kilos et les fluides s'échappant à la pression atmosphérique, la vitesse théorique de la vapeur est de 600 mètres par seconde et celle de l'eau de 35 mètres seulement.

Il faudrait donc, toutes choses égales, que l'orifice d'écoulement de l'eau eût une section vingt fois plus grande que celle qui suffirait à l'écoulement de la vapeur par la partie supérieure.

Mais quel que soit le résultat produit au point de vue de la chute de pression, nous avons à envisager une section déterminée suivant laquelle une surface de liquide à haute température se trouve brusquement en communication avec l'atmosphère.

Les effets de réaction vont-ils se produire suivant les lois de la thermo-dynamique en développant le nombre considérable de kilogrammètres que nous savons, où simplement d'après le théorème des quantités de mouvement ?

Ces théories — vraies toutes deux d'ailleurs — doivent rester vraies quelle que soit la section.

Le travail à produire par la détente adiabatique de la surface

Digitized by Google

d'eau découverte croîtra avec cette surface, mais il ne se manifestera que s'il trouve dans des circonstances extérieures une résistance capable de s'opposer à la détente.

Si nous admettons que le passage et l'espace environnant soient libres, il y a toutes chances que la réaction ne soit autre que celle donnée par la formule de M. Périssé :

$$F = 2SP$$

Mais de toute façon la comparaison faite par cet ingénieur d'un explosif détonant à la surface de rupture est exacte.

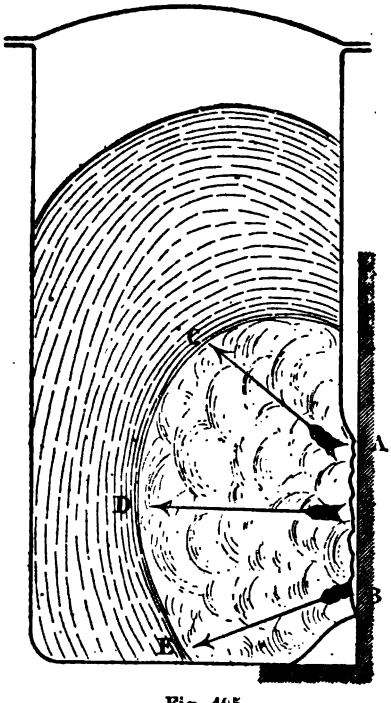


Fig. 195.

L'action explosive doit se produire dans tous les sens à moins qu'une résistance dans une zone n'en reporte tous les effets sur les parties non protégées.

Et c'est en effet ainsi que les choses doivent se produire dans les générateurs.

Si l'écoulement du fluide est libre, la résistance est intérieure et constituée par la masse d'eau qui afflue à l'ouverture sous la pression de la chaudière ; la détente se fait alors à l'extérieur sans grand travail.

Mais il peut arriver que cette détente soit gênée par la présence d'une maçonnerie latérale si la blessure est sur le côté, d'un support quelconque, si elle se produit à la partie inférieure ; de telle sorte que la section d'écoulement entre la chaudière et les corps environnants soit inférieure à la section de la blessure.

Il est alors très rationnel de supposer que le travail développé par l'explosion première en raison d'une résistance extérieure refoule l'eau à l'intérieur du générateur.

Digitized by Google

Pour fixer les idées, représentons les faits par un croquis (fig. 195).

La section de rupture AB ne pouvant donner lieu à une expansion extérieure reporte ses effets dans toutes les directions C, D, E, etc. Il en résulte une poche gazeuse A C D E B dont tous les points de la périphérie ont, à la fin de l'action, la pression même du générateur.

Instantanément la pression atmosphérique se rétablit ou tend à se rétablir par l'orifice AB. Qu'en résulte-t-il ? Une nouvelle explosion dont la surface d'action n'est plus seulement la superficie AB, mais celle beaucoup plus considérable A C D E B.

Remarquons en outre que le centre d'action est cette fois tout intérieur et que la résistance qui s'opposera au travail à produire est constituée par les parois même du réservoir.

A ce moment l'appareil paraît devoir sauter avec toute la caractéristique d'une explosion désastreuse.

On peut supposer d'autre part que la première section de la blessure fuse au lieu de détoner, que la résistance extérieure soit réelle, mais moindre que nous ne l'avons supposée, que la quantité de travail développée vers l'intérieur se borne à arrêter l'écoulement de l'eau à l'état liquide, la poche gazeuse ne tend pas moins à se former et s'agrandit jusqu'au moment où la vapeur produite est telle que l'exiguïté de l'orifice n'en permet plus la détente dans les conditions du début.

Alors il se produira ou un prolongement de déchirure aux commissures ou une explosion à effets dynamiques comme dans les suppositions précédentes.

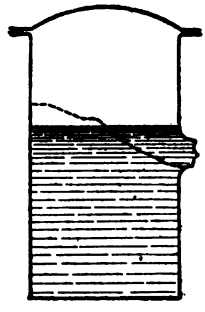


Fig. 196.

Position intermédiaire de la rupture. — La déchirure se produit dans la partie baignée, mais au voisinage du plan d'eau (fig. 196).

C'est le cas intermédiaire.

En lui appliquant les raisonnements précédents, nous arrivons à conclure que l'accident aura des suites d'autant plus désastreuses que la blessure sera plus proche du plan d'eau. Il est peu

Digitized by Google

probable qu'en pareille circonstance le niveau s'abaisse graduellement suivant des plans d'eau horizontaux, et il nous paraît plus vraisemblable que la nappe supérieure disparaisse dès le premier moment pour faire communiquer la chambre de vapeur avec l'atmosphère par la section d'orifice d'écoulement.

Résumé de la nouvelle théorie. — Je résume ces diverses appréciations :

1° Les grands effets dynamiques résultent d'une explosion intérieure. Ils sont caractérisés par des cassures passant même par les lignes de plus grande résistance et donnant aux fragments des formes de tessons de poterie.

2° L'explosion intérieure n'est que le travail développé dans l'appareil par la détente de la vapeur émise par la surface du liquide chauffé, mise instantanément en communication, soit avec l'atmosphère, soit avec un milieu de pression inférieure.

3° Les effets dynamiques instantanés dépendent de la surface plus ou moins grande de liquide découvert.

4° A surface égale découverte, l'énergie développée sera proportionnelle au volume de l'eau.

5° Les ruptures dans les parties inférieures ne sont dangereuses qu'en raison des obstacles extérieurs qui peuvent se présenter.

6° Les ruptures dans les chambres de vapeur sont les plus graves.

Déductions de la théorie. — Les suppositions que je viens de faire sont déduites de phénomènes comparés dans un grand nombre d'explosions.

J'ai mis la charrue avant les bœufs en les exposant de prime abord, mais je vais aborder une série de faits qui en seront la confirmation.

Prenons les deux cas cités par M. Périssé :

	Say.	Lebaudy.
Pression effective	$5^k,1/4$	$4^k,1/3$
Vitesse théorique d'écoulement	$35^m,100$	$32^m,150$
Section d'écoulement	$1\,200^{cm^2}$	$2\,300^{cm^2}$
Volume d'eau	19 200 lit.	20 000 lit.
Temps nécessaire à la vidange (sous la pression initiale)	4"1/2	2"1/2

Digitized by Google

Les calculs supposent que la section mesurée a été la section initiale et admettent que la pression de marche s'est maintenue pendant toute la durée de l'écoulement, mais si l'on tient compte de la réduction de vitesse résultant de la perte d'énergie intérieure, on voit que la durée de la vidange dans les deux cas exclut toute idée d'instantanéité.

Etude de M. Vinçotte sur les explosions de locomotives. — On ne saurait trouver un champ d'observations plus vaste et plus varié que celui qui m'a été fourni par une publication de M. Vinçotte, parue il y a une dizaine d'années, sur les explosions de chaudières de locomotives.

Les recherches portent sur l'examen détaillé de 89 explosions. Les conclusions sont que les causes d'accidents pour ce genre de générateur sont en somme assez restreintes, et que les effets particuliers à chaque cause se reproduisent avec une grande similitude.

L'examen des faits qui se produisent a été poursuivi suivant la position des points d'origine de rupture ; cette classification coïncide donc avec la méthode de recherches que je devais adopter moi-même en y ajoutant toutefois quelques subdivisions.

Ruptures suivant les rivures longitudinales du corps cylindrique. — La cause de ces ruptures est une corrosion intérieures en sillon, le long d'une ligne de matage ; elle est particulière aux locomotives, car elle s'observe rarement dans les chaudière, fixes.

M. Vinçotte dit à ce propos :

« Comme le sillon est ordinairement plus profond au milieu de la virole qu'à ses extrémités, c'est là que la déchirure commence en se prolongeant longitudinalement.

« La présence des rivures transversales change cela à cause de leur résistance moindre et le plus souvent, lorsque la déchirure atteint les extrémités de la virole, la tôle se déroule vers le haut et vers le bas en s'arrachant le long des rivures transversales ; les morceaux sont ensuite projetés du côté opposé à celui par où l'explosion a commencé.

Digitized by Google

« Il arrive aussi lorsque les premières cassures se sont propagées lentement, que la pression tombe avant que le déroulement soit complet et que l'explosion se borne à une ouverture plus ou moins grande sur le côté.

« Le faisceau forme un entretoisement si solide pour les plaques tubulaires que, malgré l'arrachement d'une partie des tubes, le

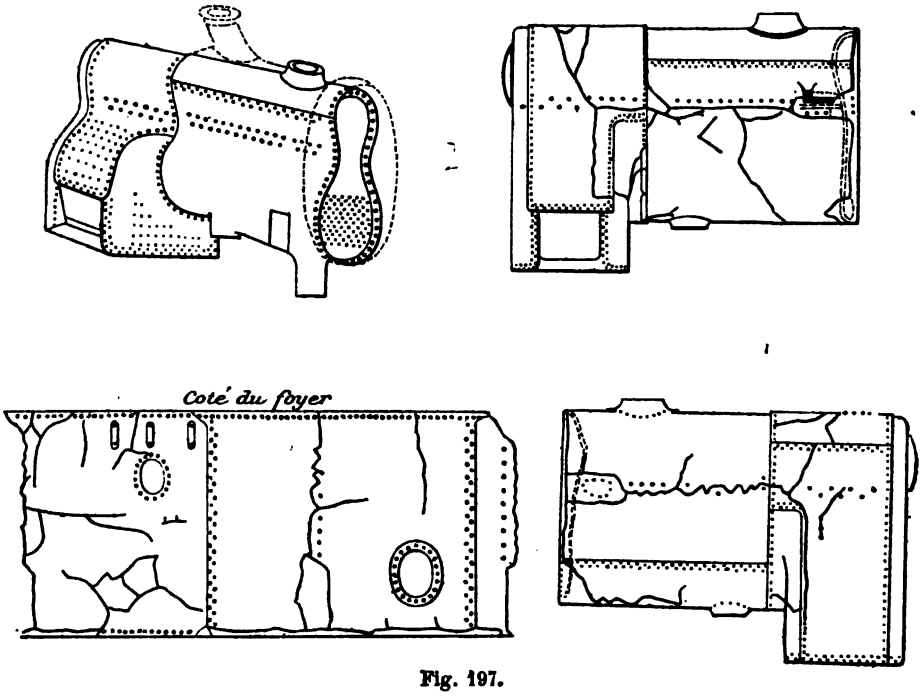


Fig. 197.

foyer et la boîte à fumée restent le plus souvent réunis ensemble.

« Dans les explosions du corps cylindrique, la locomotive reste souvent sur la voie. Il n'y a guère renversement que lorsque la cassure est latérale et se limite à une large ouverture béante.

« Lorsque au contraire la virole se déroule, la réaction change à chaque instant et n'agit en général que pendant un temps trop court, avec une force supérieure à la stabilité de la locomotive.

« Comme tous ces faits n'occasionnent que des projections latérales, les machinistes sont rarement atteints et, bien que ces

Digitized by Google

explosions soient souvent d'une extrême violence, elles sont en général peu meurtrières.

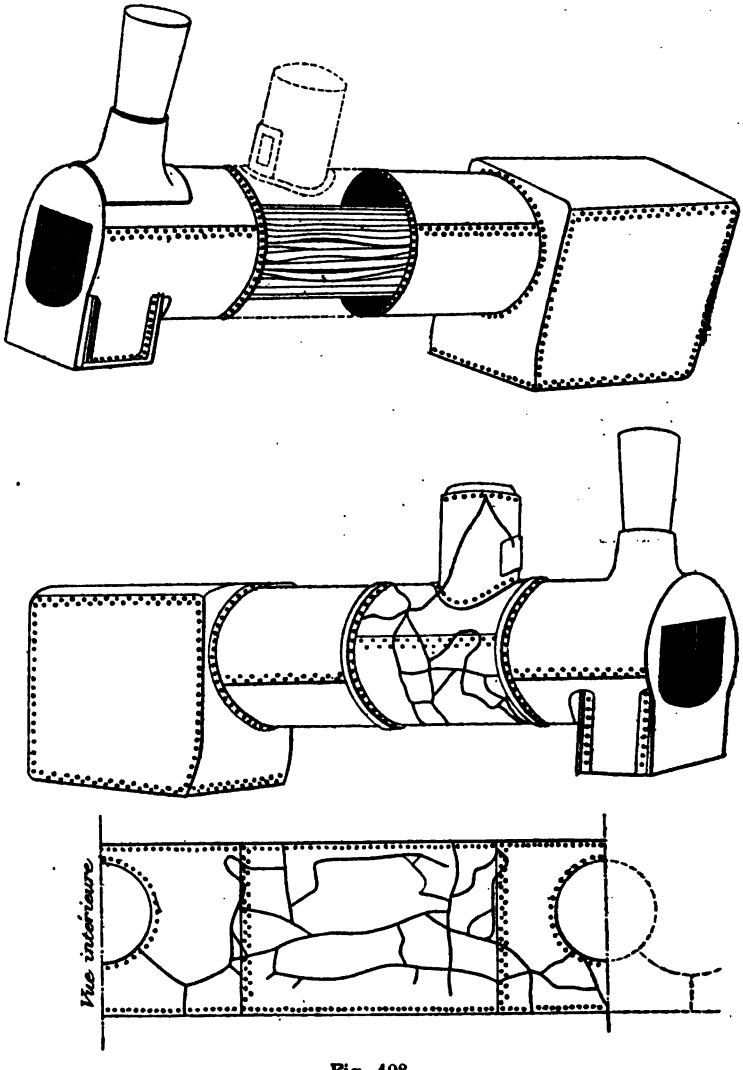


Fig. 198.

« Les 31 explosions de ce genre qui ont été observées n'ont tué que 8 hommes. »

Comme on le voit, l'auteur ne se préoccupe pas de la distance entre la rivure et le plan d'eau. Les rivures longitudinales peuvent

Digitized by Google

se présenter cependant à des hauteurs très variables entre elles.

C'est ainsi que dans l'exemple n° 2, elles se trouvent au-dessus du niveau normal, tandis que dans l'exemple n° 3, les rivures supérieures sont immergées de 20 centimètres et les plus basses de 50 centimètres. Or nous allons voir que plus les rivures sont élevées, plus puissants sont les effets dynamiques.

Exemple n° 2 (fig. 197). — Chaudière en forme de 8. Déchirure d'une rivure supérieure. Rupture de toutes les tôles supé-

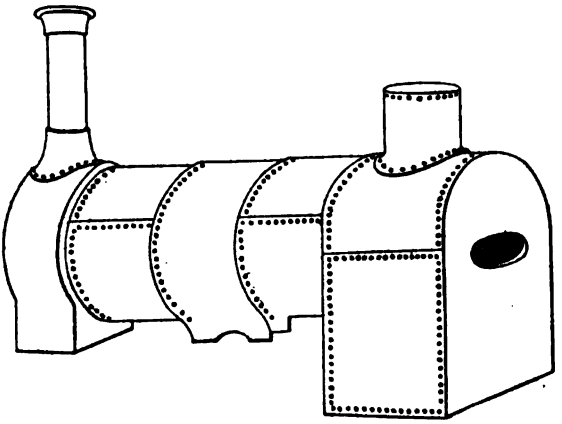


Fig. 199.

rieures et inférieures. Projection à distance du foyer et de la boîte à feu reliés par le faisceau tubulaire.

Exemple n° 3 (fig. 198). — Déchirure d'une rivure inférieure immergée de 50 centimètres ; les deux demi-viroles du dernier anneau se sont déroulées et ont été projetées l'une, la supérieure, à 100 mètres, l'autre à 30 mètres.

La locomotive qui se trouvait remisée n'a pas bougé. Il est probable que la large section d'écoulement produite par l'enlèvement de l'anneau a arrêté tout travail dans les autres parties de la chaudière, car elles sont restées intactes. Tenons compte aussi de l'entretoisement du faisceau tubulaire qui neutralise les efforts de réaction.

Exemple n° 4 (fig. 199). — Pendant un arrêt la pression a monté de 100 livres et l'enveloppe cylindrique s'est déchirée en commençant par un trou d'homme non renforcé du dessous de la chaudière.

Digitized by Google

La cassure s'est prolongée jusqu'aux rivures transversales, puis il y a eu un commencement de déroulement et c'est tout.

Les trois exemples que je viens de citer sont des plus caractéristiques. Si on ne trouve pas dans tous les cas intermédiaires cités par M. Vinçotte une confirmation aussi absolue du danger des ruptures supérieures, le manque de preuves vient plutôt du défaut de certitude dans les circonstances de l'accident. Mais aucune des données fournies n'infirme la théorie que je viens d'exposer.

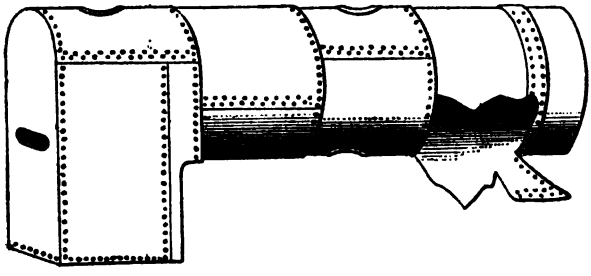


Fig. 200.

Réactions sans explosion intérieure. — Il ne faudrait cependant pas conclure à la bénignité forcée d'une explosion, parce qu'elle se limite à la partie inférieure. S'il n'y a pas explosion intérieure, il peut se produire néanmoins des efforts de réaction puissants avec des ouvertures à large section.

L'exemple n° 55 est à signaler (fig. 200). La tôle inférieure de la dernière virole s'est détachée contre la boîte à fumée. La réaction a soulevé l'avant de la locomotive en la faisant pivoter sur l'arrière, de telle sorte qu'elle est tombée sur le tender la cheminée en dessous.

On s'explique très bien que c'est la position même de l'ouverture qui a produit le mouvement et que l'action de la pesanteur de la machine ne s'est pas exercée normalement à l'effort.

Explosions par les dômes. — M. Vinçotte classe dans la même catégorie les explosions par les dômes, bien qu'à mon point de vue elles doivent avoir en général des conséquences plus graves ; il dit à ce propos :

« Les explosions de dômes ont à peu près le même caractère

Digitized by Google

général, bien qu'elles commencent, d'une foule de façons différentes, car, suivant la construction des dômes, leur point faible est d'un côté ou de l'autre, mais une fois que les cassures arrivent dans le corps cylindrique, elles aboutissent également au déroulement d'une ou de plusieurs viroles. »

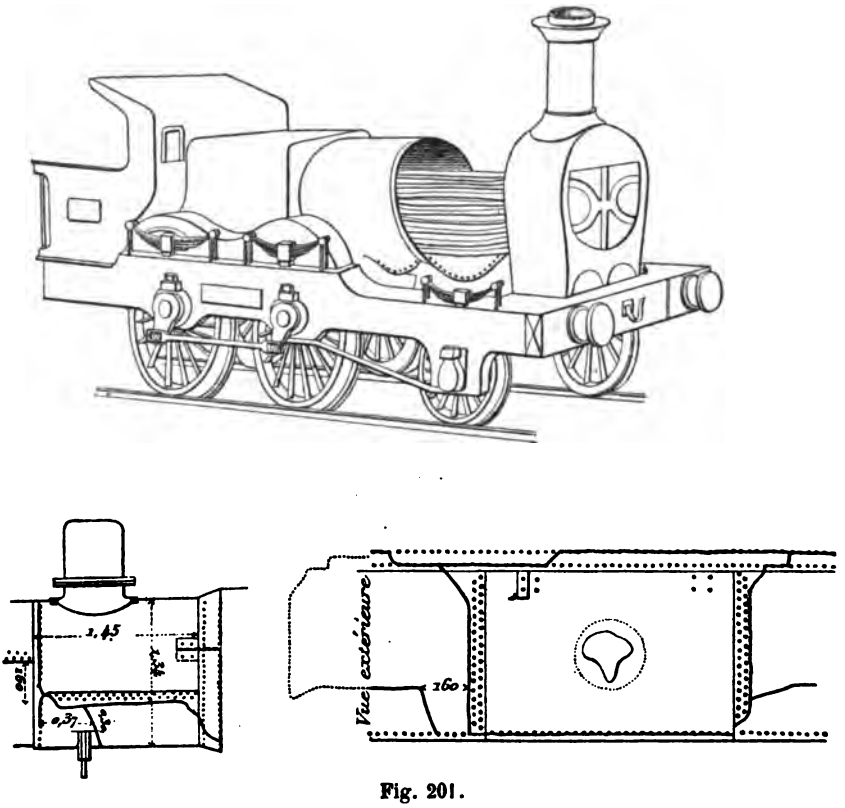


Fig. 201.

La différence des effets ne peut en effet provenir que de la construction des dômes ou, plus exactement, de la section d'orifices par laquelle ils sont en communication avec les corps cylindriques.

Les ruptures les plus graves doivent coïncider avec l'arrachement des rivures qui relient ces deux parties.

L'exemple n° 9 (fig. 201) ne laisse aucun doute à ce sujet :

« 19 juin 1874 — Grand Central Belge. — Pression 8 atmosphères, chaudière essayée à la presse à 12 atmosphères le 12 juin 1874. La mise en usage date du 4 novembre 1871.

Digitized by Google

« La virole du corps cylindrique sur laquelle se trouvait le dôme s'est brisée en un grand nombre de fragments qui ont été dispersés au loin.

« Le dôme a été partagé en deux pièces lancées en sens inverse l'une de l'autre.

« La première déchirure s'est produite en travers de l'ouverture carrée pratiquée vers le bas du dôme pour le passage de la prise de vapeur.

« La locomotive remorquait un train de marchandises sur une rampe : ce qui en restait a continué son chemin après l'explosion, et le train ne s'est arrêté que par amortissement de sa force vive. »

Le n° 22 est analogue :

« 22 juin 1872, Compagnie d'Orléans.

« L'explosion s'est produite en marche, à 65 kilomètres à l'heure.

« Le corps cylindrique s'est déchiré en tous sens. Les ruptures sont en pleine tôle. La boîte à feu et la boîte à fumée sont restées à peu près intactes.

« Le dôme s'est séparé de la chaudière à l'emboutissage. La cause de l'explosion n'a pas été directement reconnue ; mais comme la base du dôme constituait un point faible et que plusieurs chaudières du même type ont eu leur corps cylindrique fendus pendant les épreuves, au pourtour de la base du dôme, on a supposé que l'explosion a commencé en ce point. »

De nombreux cas sont énumérés, quelques-uns sans citation d'effets dynamiques. Nous attribuons ces derniers soit à des renseignements incomplets, soit à des dispositions ne laissant que de faibles sections de communication des corps cylindriques avec l'atmosphère.

Explosions par les foyers ou leur enveloppe. — Les pièces soumises à des flexions constituent la partie la plus délicate des chaudières de locomotives. Aussi sur 69 explosions dont la cause est nettement déterminée, relève-t-on 31 cas dus à la rupture des parties fléchissantes.

Les plaques de façade des foyers sont particulièrement sujettes à ce mode de rupture.

Digitized by Google

Ici encore nous classerons les effets de destruction suivant que les fentes se produisent à la partie supérieure, dans la chambre de vapeur, ou à la partie basse, dans la partie immergée.

Exemple n° 4. — C'est une crevasse ayant son maximum à la partie supérieure. La tôle se rabat sur le palier. La réaction lance la machine en cassant les attelages et lui fait parcourir un kilomètre.

Exemple n° 7. — La crevasse se produit dans l'angle de gauche dans la partie noyée et ne dépasse pas en hauteur le ciel du foyer.

Dégâts matériels très faibles.

L'exemple n° 8 (fig. 202) est une exception à citer. La crevasse

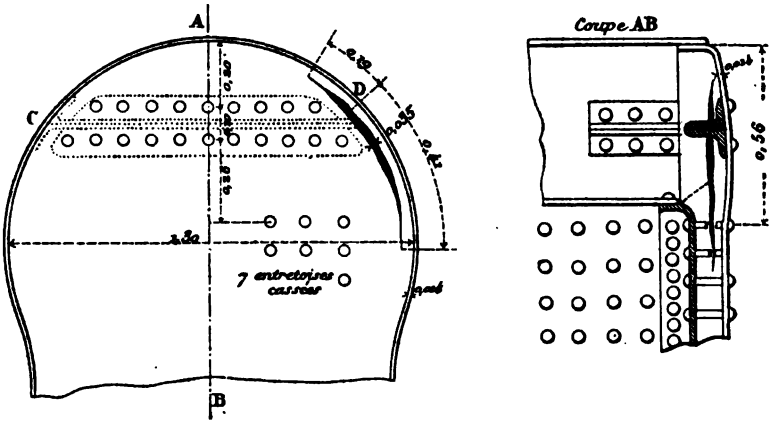


Fig. 202.

est bien dans la partie supérieure, mais en un point renforcé par une équerre.

La fissure s'est ouverte sur une longueur de 10 centimètres seulement, donnant aux lèvres un maximum d'écart de 35 millimètres.

L'exception s'explique par les résistances de la chaudière autour de la blessure, résistances qui n'ont permis qu'une ouverture de 17,5 centimètres carrés correspondant à la section d'un tube de vapeur de 57 millimètres de diamètre.

Il n'y a pas eu chute brusque de pression.

Les ruptures des foyers produisent, d'après M. Vinçotte lui-même, des effets considérables ou insignifiants, suivant que c'est le ciel qui s'écrase ou une paroi latérale qui cède.

Digitized by Google

Il faut en effet remarquer que, dans le premier cas, la chambre de vapeur est presque instantanément en communication avec l'atmosphère par le foyer et que dans le second au contraire la rupture, qui se produit généralement au niveau de la grille, est profondément immergée.

« Lorsque le ciel du foyer vient à céder, la réaction soulève la locomotive en la faisant tourner et la lance vers l'avant où elle retombe le plus souvent sens dessus dessous. »

N° 78. — 26 décembre 1881. Stokton-on-Tees. North Eastern Railway.

« Locomotive à marchandises.

« Ecrasement du ciel du foyer pendant que la machine stationnait.

« Le ciel du foyer a écrasé la tôle d'arrière du foyer, l'a arrachée jusqu'au-dessus de la porte, et s'est rabattue autour de l'arête supérieure de la tôle tubulaire. En même temps il a produit dans la face latérale les déchirures et arrachements d'entre-toises nécessaires pour lui permettre ce mouvement.

« La réaction souleva la chaudière en l'arrachant de ces longerons, la fit tourner vers l'avant et la jeta sur le sixième wagon d'un train qui stationnait. »

M. Vinçotte explique que le manque d'effets de projection dans la rupture des parois latérales est dû à la section de vidange qui se trouve forcément limitée au débit permis par la lame d'eau, c'est-à-dire à un diamètre égal au plus à 4 fois l'épaisseur de la lame.

Cette explication est très rationnelle, mais elle ne va pas à l'encontre des autres raisons que nous avons fait valoir.

Enfin relevons une dernière preuve de notre hypothèse dans les causes diverses pour un cas assez bizarre qui s'est présenté cependant plusieurs fois.

Les exemples 81-83-84 sont identiques :

Rupture d'une bielle dont un fragment a percé la chaudière, à la partie basse naturellement. Pas d'autre dégât.

Rupture d'équilibre. — Je suis d'avis que normalement l'état de surchauffe, c'est-à-dire l'état de l'eau à une température supé-

Digitized by Google

rieure à la pression correspondante, n'existe pas. D'après les faits que je viens d'énumérer, cet état doit cependant se produire exceptionnellement. L'abaissement brusque de pression rompt l'équilibre avec l'instantanéité nécessaire à l'hypothèse. Car si on n'admet pas de phénomène instantané il n'y a d'explosion possible en aucune circonstance.

Comme corollaire obligé de la rupture d'équilibre entre les pressions et les températures, il faut admettre aussi le dégagement brusque de la vapeur nécessaire au rétablissement de l'équilibre.

Cette quantité de vapeur peut être supérieure à celle qui correspondrait à la capacité disponible sous la pression inférieure nouvelle.

On peut donc admettre que cette dernière phase produira soit un choc, soit plus vraisemblablement une transformation en travail de la vapeur supplémentaire.

Mon hypothèse vaut ce qu'elle vaut, il suffit qu'elle explique un phénomène non encore justifié pour être admise au moins provisoirement.

Or jusqu'à présent, à ma connaissance du moins, aucune raison valable n'a été donnée aux explosions relativement fréquentes qui se produisent à la mise en marche. Le fait d'ailleurs est tellement reconnu que toutes les instructions sur la conduite des appareils à vapeur recommandent de n'ouvrir que très modérément les prises de vapeur au début.

Expérience de M. Lawson. — Dans le même ordre d'idées, quelle autre explication donner aux résultats de l'expérience faite par M. Lawson et relatée dans la *Revue industrielle* du 13 juillet 1881.

Cet ingénieur fit construire un récipient devant résister à une pression de 42 kilos. (Il n'est pas dit si ce chiffre est la limite de résistance ou le coefficient de sécurité.)

L'appareil était cylindrique à $0^m,75$ de diamètre sur $1^m,80$ de longueur. Le niveau de l'eau laissait à la chambre de vapeur une flèche de $0^m,175$. A la pression de 26 kilos 3/4, on ouvrit brusquement la valve en grand et la chaudière fit explosion.

Digitized by Google

Et encore dans cette expérience une rupture préalable n'avait pas causé d'affaiblissement comme dans tous les cas des explosions ordinaires.

Explosion de l'usine Cartier à Aubagne. — Une explosion qui se produisit le 29 juin 1877 à Aubagne, sur laquelle j'ai pu me procurer les détails les plus circonstanciés, m'a fourni un exemple typique :

L'usine Cartier possédait deux générateurs à bouilleurs : le plus petit fit explosion. La figure 203 le représente reconstitué après la catastrophe. Le corps principal était composé de 5 viroles cylindriques, les deux fonds étaient demi-sphériques. L'explosion présente des phases très distinctes qu'il est nécessaire d'énumérer. Notre théorie explique ces bizarres effets.

Première phase. — La dernière rivure circulaire s'arrache. Le fond arrière retenu par les maçonneries reste à peu près en place.

Deuxième phase. — Une explosion intérieure déterminée par la première section de rupture détruit la dernière virole dont les fragments ont été retrouvés dans la chaufferie. Les deux cuissards reliés à cette virole restent fixés aux bouilleurs. Tout ce qui reste au corps principal, c'est-à-dire quatre viroles encore intactes et le fond sont projetés en avant arrachant les cuissards antérieurs des premières tôles supérieures des bouilleurs.

Troisième phase. — Le projectile ainsi constitué retombe sur le sol d'un boulevard, à 175 mètres du point de départ. De ce choc résulte une deuxième explosion intérieure qui sépare le corps cylindrique en deux tronçons par la rupture de la deuxième rivure transversale.

L'un, composé de trois viroles complètes, rebondit une première fois à 7 mètres, une deuxième à 9 mètres, où il s'arrête.

Le culot de gargousse formé par le fond avant et la première virole s'élève à nouveau et est arrêté à $4^{m},500$ de hauteur par les maîtresses branches d'un arbre distant de 21 mètres du premier point de contact avec le sol. Cette seconde pièce avait franchi un espace de 186 mètres.

Quatrième phase. — Les bouilleurs, de leur côté, n'étaient pas

Digitized by Google

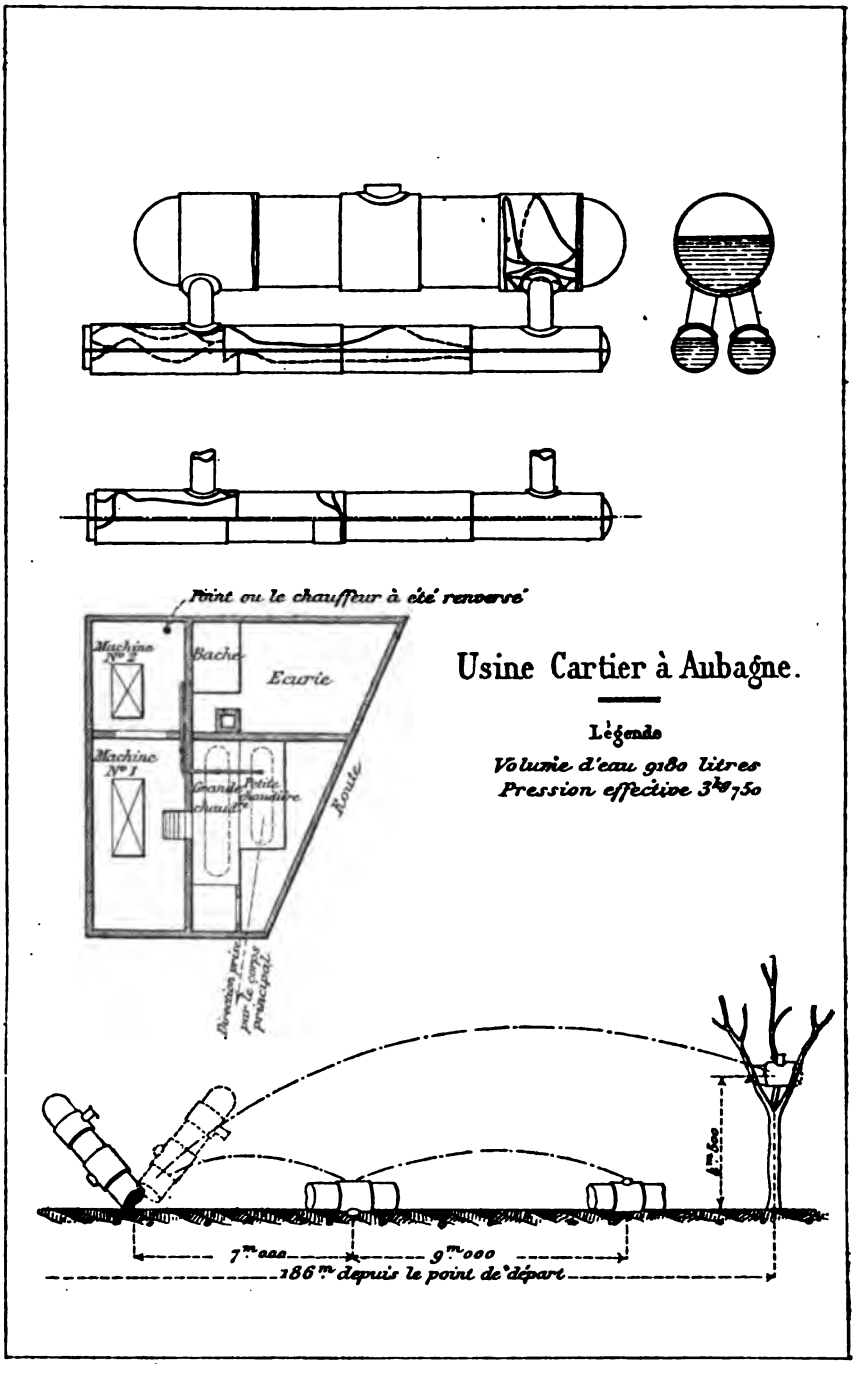


Fig. 203.

Digitized by Google

restés inactifs. Chacun d'eux avait fait explosion, pour son compte. On sait que tous les bouilleurs ont des ciels de vapeur déterminant, surtout à la partie antérieure, un plan d'eau suivant une corde qui peut atteindre 25,30 mm. et même plus. La disposition des cuissards de cette chaudière paraissait même devoir aggraver ce défaut. Il n'est donc pas surprenant que l'arrachement des premières tôles supérieures ayant mis une grande surface liquide en communication avec l'atmosphère ait déterminé deux nouvelles explosions. Les cassures avaient d'ailleurs, surtout au bouilleur de droite, la forme caractéristique des ruptures par effet interne. En décomposant les effets dynamiques de cet accident, on arrive à constater que la première rupture a été suivie de quatre explosions parfaitement distinctes.

Digitized by Google

CHAPITRE XIX

COMBUSTION ET CHAUFFAGE

Notre étude sur les générateurs de vapeur n'a porté spécialement que sur la transmission de l'énergie du combustible à la vapeur d'eau ; elle serait incomplète sans un examen sommaire des moyens à employer pour obtenir une bonne combustion et, dans un autre ordre d'idées, une épuration efficace des eaux d'alimentation : aussi allons-nous rapidement examiner ces deux questions importantes.

Combustion des corps. — Le phénomène de la combustion, qui accompagne le changement d'état chimique d'un corps, se manifeste par un dégagement de chaleur le plus souvent lumineuse : la flamme se produit par la combustion des corps gazeux, l'ignition par celle des corps solides.

La combinaison chimique qui produit d'une façon générale la combustion d'un corps, est son oxydation rapide [1] : la chaleur et la lumière n'étant qu'un accroissement des mouvements moléculaires d'un corps on peut dire que l'oxygène produit par son affinité chimique cette manifestation de l'énergie.

La combustion peut être spontanée : les corps très avides d'oxygène exposés à l'air l'absorbent avec facilité ; cette absorption est d'abord accompagnée d'une faible élévation de température, mais elle augmente le pouvoir d'oxydation, et la tempéra-

[1] Les corps peuvent brûler aussi dans d'autres gaz, tels que le chlore ou l'hydrogène, et la combustion lumineuse peut se produire également dans la combinaison de corps simples solides avec des corps simples liquides ou solides, tels que le potassium et le mercure, la limaille de fer et le soufre.

Digitized by Google

ture s'élevant avec ce dernier, elle finit par atteindre une valeur suffisante pour produire la combustion lumineuse.

Lorsque le combustible est gazeux, que son mélange avec l'oxygène est intime, et que les volumes mélangés sont dans de certaines proportions, la combustion se produit instantanément dans toute la masse avec explosion, si un point quelconque est porté à une température suffisamment élevée pour y produire une oxydation immédiate. L'explosion se produit également si les combustibles sont liquides ou solides, et intimement mélangés avec un autre corps liquide ou solide libérant facilement l'oxygène qui entre dans sa composition chimique : l'échauffement d'un point par percussion, frottement ou contact avec un corps chaud, suffit pour produire la combustion instantanée de toute la masse : tels la nitroglycérine, le soufre ou le charbon mélangés à un nitrate ou un chlorate.

Si le mélange avec l'oxygène n'est pas intime, et n'a lieu que par contact sur la surface extérieure des corps, la combustion est lente et n'a lieu que dans les zones de contact.

C'est le genre de combustion qui nous intéresse : celui qui a lieu sur les grilles des appareils à vapeur, l'oxygène étant fourni par l'air auquel on donne accès dans le foyer.

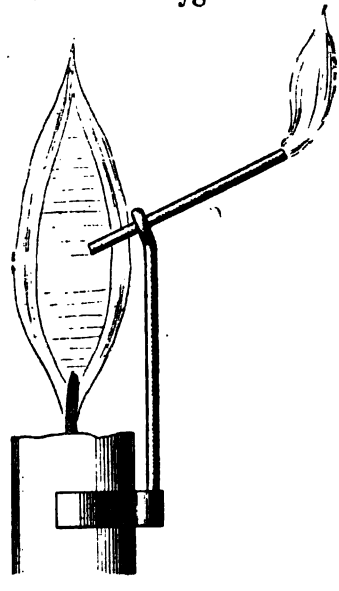


Fig. 204.

Une flamme n'est lumineuse que si elle contient des particules solides en suspension, lesquelles, portées à l'incandescence par la chaleur de la combustion, rayonnent de la lumière et de la chaleur : cette luminosité de la flamme n'existe qu'à la surface en contact avec l'air ; si on introduit dans l'intérieur de la flamme d'une bougie un tube, ouvert à ses deux extrémités (fig. 204), les gaz de la partie centrale de la flamme s'échapperont incolores, par l'extrémité du tube, où leur présence sera constatée par allumage ; on peut également placer une toile métallique sur une flamme en l'interceptant en partie, et l'on observe que la lumi-

Digitized by Google

nosité de la périphérie du cône de la flamme est nettement visible par antagonisme avec la zone centrale qui reste sombre. Ainsi la longueur d'une flamme est déterminée par le temps nécessaire pour que dans une tranche de gaz combustible l'oxydation soit complète en passant de la périphérie au centre.

Les particules solides rayonnantes brûlent dès qu'elles sont en présence d'un excès d'oxygène, mais si la quantité d'air produisant la combustion des gaz n'est pas suffisante, ces particules incandescentes se refroidissent faute de pouvoir brûler et forment de la suie : la fumée n'est que de la suie entraînée avec les gaz brûlés.

La combustion d'un gaz pur n'est donc jamais accompagnée de phénomènes lumineux, ceux-ci n'étant produits que par l'incandescence des particules solides en suspension.

Combustibles ordinaires. — La houille est le combustible généralement employé dans les foyers des générateurs de vapeur : viennent ensuite l'anthracite, le coke, le lignite, le bois, la tourbe. Quelques essais ont été faits pour l'emploi de combustibles liquides, tels que les huiles lourdes provenant de la distillation des pétroles ou de la houille.

Les principaux constituants de ces combustibles sont le carbone et l'hydrogène, lesquels en s'oxydant produisent, le premier de l'acide carbonique si la combustion est parfaite, de l'oxyde de carbone si elle est imparfaite, et le deuxième de la vapeur d'eau. Lorsqu'un combustible contient de l'oxygène, celui-ci se combine au huitième de son poids d'hydrogène pour former de l'eau, et l'excès d'hydrogène seul contribue à l'élévation de température qui accompagne la combustion.

Quantité d'air nécessaire pour la combustion. — Connaissant la composition chimique d'un corps combustible, on détermine la quantité d'oxygène nécessaire à sa combustion parfaite. L'hydrogène se combine, en volume, à deux volumes d'oxygène et, en poids, à huit fois son poids d'oxygène pour former de la vapeur d'eau, et le carbone se combine, en volume, à deux volumes d'oxygène, et, en poids, à deux fois et deux tiers de son poids

Digitized by Google

pour former de l'acide carbonique. Si l'oxygène n'est pas en quantité suffisante pour la combustion parfaite, le carbone se combine à un volume d'oxygène, ou, en poids, à une fois un tiers de son poids pour former de l'oxyde de carbone, lequel en présence d'un excès d'oxygène brûle à nouveau pour former de l'acide carbonique.

L'oxyde de carbone étant incolore, on voit que, faute d'une quantité d'oxygène convenable, la combustion peut être imparfaite sans production de fumée, celle-ci n'étant que le résultat de l'extinction de la flamme, et pouvant se produire même avec un large excès d'oxygène.

L'air atmosphérique pur et sec se compose, d'après Morin et Tresca, des proportions suivantes :

En poids :	oxygène	0,236	1,000
	azote	0,764	
En volumes :	oxygène	0,213	1,000
	azote	0,787	

Dans les conditions ordinaires, l'air contient une plus ou moins grande proportion d'acide carbonique et de vapeur d'eau : Péclet indique comme moyenne à 15°, sous la pression de 760 millimètres de mercure, les proportions suivantes :

	Volumes	Poids
Acide carbonique	0,0005	0,001
Vapeur d'eau	0,0125	0,008
Oxygène	0,2050	0,228
Azote	0,7820	0,763
	1,0000	1,000

Le poids d'un mètre cube d'air dans ces conditions est de $1^k,214$, contenant :

$$1,214 \times 0,228 = 278 \text{ grammes d'oxygène.}$$

Le kilogramme d'oxygène sera contenu dans 3 600 litres d'air, pesant $4^k,370$.

Un kilogramme de carbone exigeant pour sa combustion complète $2^k,66$ d'oxygène, le volume d'air nécessaire à cette combustion sera de $2,66 \times 3\,600 = 9\,576$ litres.

Digitized by Google

De même le volume d'air nécessaire à la combustion d'un kilogramme d'hydrogène sera de $8 \times 3\,600 = 28\,800$ litres.

Le volume d'air nécessaire à la combustion parfaite d'un combustible dont la composition chimique est connue, peut ainsi être déterminée théoriquement.

Mais les volumes d'air introduits dans le foyer ne peuvent être constamment réglés d'après les besoins de la combustion, et pour obtenir à tout moment la quantité d'oxygène nécessaire, il faut admettre dans la pratique un excès de ce gaz : d'après les recherches expérimentales de MM. Scheurer-Kestner et Meunier (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1868-69-71), il résulte que le rendement maximum de la houille est obtenu avec un excès d'air de 33 p. 100 ; les chiffres qui précèdent doivent donc être ramenés en pratique à :

Pour un kilogramme de carbone $\frac{9\,576}{0,66} = 14,5$ mètres cubes.

Pour un kilogramme d'hydrogène $\frac{28\,800}{0,66} = 43,6$ mètres cubes.

Prenant par exemple une houille dont la composition élémentaire serait de :

Carbone.	80	p. 100.
Hydrogène.	4,5	—
Oxygène.	14,5	—

nous déterminerons comme suit les volumes d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme :

L'oxygène étant combiné à l'hydrogène, le poids de ce gaz libre sera de $45 - \frac{145}{8} = 27$ grammes :

Pour $0^k,027$ d'hydrogène. . .	$43,6 \times 0,027 =$	$1,177^{m^3}$
Pour $0^k,800$ de carbone. . . .	$14,5 \times 0,8 =$	$11,600^{m^3}$
Ensemble		$12,777^{m^3}$

Volumes occupés par les produits de la combustion. — Les volumes occupés par les produits de la combustion à la sortie de la chaudière, varient suivant leur température, et sont pour des températures de 150 et 300° :

Pour 1 kilogramme de carbone à 150° $21,3^{m^3}$
— — à 300° $28,9^{m^3}$

Digitized by Google

Pour 1 kilogramme d'hydrogène à 150° 72,2$^{m^3}$
— — à 300° 98,2$^{m^3}$

Dans le calcul des volumes de gaz à évacuer par les cheminées il y a lieu d'ajouter aux chiffres qui précèdent le volume occupé par la vaporisation de l'eau qui se trouvait dans le combustible, soit comme eau hygrométrique, soit comme eau de constitution, 1 kilogramme de vapeur d'eau occupant sous la pression de 760 millimètres de mercure 1,928$^{m^3}$ à 150°, et 2,612$^{m^3}$ à 300°.

Ainsi, en reprenant l'exemple de houille ci-dessus, nous verrons que les volumes des produits de la combustion seront pour 1 kilogramme de houille :

	à 150°	à 300°
Carbone.	17,04$^{m^3}$	23,12$^{m^3}$
Hydrogène	1,95$^{m^3}$	2,65$^{m^3}$
Eau de constitution $\frac{0^k,145 \times 9}{8} = 0^k, 163$ . . .	0,31$^{m^3}$	0,42$^{m^3}$
Ensemble.	19,30$^{m^3}$	26,29$^{m^3}$

chiffres relatifs à la houille sèche et auxquels il y a lieu d'ajouter le volume de vapeur produit par le pourcentage d'humidité du combustible.

Puissance calorifique des combustibles. Calorimètres. — Le calcul de la puissance calorifique d'un combustible d'après sa composition chimique présente des causes d'incertitude ; quoique les températures de la combustion des éléments constitutifs aient pu être déterminées avec soin, nous ignorons d'une façon complète les quantités de chaleur absorbées pour provoquer la dissociation des éléments d'un combustible.

MM. Fabre et Silbermann (*Annales de Physique et de Chimie*, 3e série, vol. XXXIV) construisirent un calorimètre, pour la mesure directe de la chaleur de la combustion : leur appareil était d'une délicatesse extrême dans la mise en œuvre et les résultats devraient être complétés par des analyses chimiques et par de nombreuses corrections.

Le calorimètre à bombe a permis de déterminer d'une façon simple et suffisamment rigoureuse la puissance calorifique d'un combustible : celui-ci est pulvérisé et placé dans un creuset en platine qu'on insère dans une boule en fer de forte épaisseur,

Digitized by Google

qu'on remplit ensuite avec de l'oxygène humidifié, à une pression de 25 kilogrammes. Le tout est placé dans un calorimètre à eau, et lorsque la température s'est uniformisée, on enflamme le charbon au moyen d'une étincelle électrique.

L'accroissement de température du calorimètre permet de calculer le nombre de calories dégagées par la combustion du corps à expérimenter, en tenant compte de quelques corrections dont les principales sont relatives à l'humidité et aux cendres.

Un instrument très simple et donnant des résultats très suffisants, surtout si l'on cherche à déterminer les pouvoirs calorifiques relatifs d'une série de combustibles, c'est le calorimètre de Thomson représenté figure 205. Un petit creuset en platine F reçoit le charbon cassé en menus morceaux. Le flacon sans fond contenant le creuset est fermé dans le bas par un bouchon muni de plusieurs tubes recourbés D à orifice effilé. Un tube O traverse le goulot, et est en communication avec un réservoir d'oxygène : il est muni à son sommet d'un bouchon mobile. Le tout est plongé dans un vase W contenant un poids d'eau connu, en ayant soin d'empêcher toute rentrée d'eau, et l'on attend que l'équilibre des températures se soit établi. L'appareil est complété par un thermomètre à mercure très sensible qui plonge dans l'eau : dès qu'on est prêt, on laisse tomber par le tube O un petit morceau d'amadou enflammé sur le charbon, on referme immédiatement le bouchon et on ouvre le robinet de communication avec le réservoir à oxygène : les produits de la combustion s'échappent par les orifices des tubes D au travers de la masse d'eau à laquelle ils cèdent la plus grande partie de leur chaleur. Lorsque la combustion est complétée, on fait rentrer l'eau dans le flacon afin d'absorber toute la chaleur qu'il contient, on la refoule ensuite à l'extérieur et on mesure

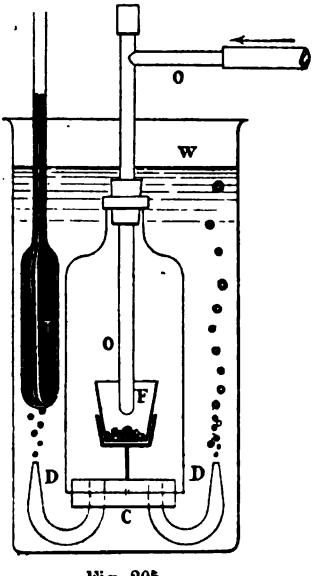


Fig. 205

Digitized by Google

l'accroissement de température de toute la masse. Si l'on veut obtenir des résultats exacts, il est nécessaire d'empêcher les pertes par rayonnement des parois du calorimètre et d'employer de l'oxygène humidifié ayant la même température que l'eau, afin d'empêcher l'évaporation de l'eau du calorimètre par la surface des bulles de gaz qui la traversent. L'eau du calorimètre doit être légèrement acidulée pour éviter toute absorption d'acide carbonique. Il faut tenir compte de l'hydrogène et de l'humidité du charbon qui ne sont pas convertis en vapeur d'eau, mais en eau liquide, et ajouter en outre 10 p. 100 pour les pertes qu'on ne saurait empêcher.

Voici les puissances calorifiques observées pour la combustion complète d'un kilogramme des principaux combustibles :

	Calories.	
Hydrogène	34600	Favre et Silbermann
— sous déduction de la chaleur latente de l'eau formée	29000	Thomas et Laurent
Matières volatiles de la houille	22100	H. Fritz
Gaz d'éclairage	10000	Morin et Tresca
Pétrole	10000	H. Fritz
Houille du Creusot	9400	Scheurer-Kestner
— d'Anzin	9200	— —
— anglaise (Nixon's coal)	9000	— —
Anthracite	8100	H. Fritz
Carbone	8100	Favre et Silbermann
Houille (moyenne des bonnes qualités marchandes)	7500	H. Fritz
Coke à 4 p. 100 de cendres	7000	—
Lignites	6200	Scheurer-Kestner
Coke à 15 p. 100 de cendres	6000	H. Fritz
Tourbe séchée	5000	—
Bois sec	4000	Péclet
Tourbe à 20 p. 100 d'eau	3600	H. Fritz
Bois à 25 p. 100 d'eau	2800	Péclet
Paille	1900	H. Fritz
Tannée	1200	Péclet
Oxyde de carbone	1000	Favre et Silbermann

Températures accompagnant la combustion. — Dans les combustibles solides, la quantité de chaleur émise par rayonnement étant environ la moitié de la chaleur totale dégagée par la combustion, une moitié de celle-ci concourt seule à l'élévation de température de la flamme.

Digitized by Google

Voici, d'après Péclet, les températures théoriques maxima produites par la combustion en présence de l'air atmosphérique à 0° :

Hydrogène	1439°
Oxyde de carbone	1483°
Carbone pur	1758°

En pratique ces températures sont rarement atteintes, et en sus l'humidité de l'air absorbe une notable quantité de chaleur.

M. G.-H. Babcock donne dans son catalogue de chaudières multitubulaires le tableau suivant pour les principales températures de combustion :

NATURE DU COMBUSTIBLE	AIR nécessaire à la combustion en kilogr. par kilogr. de combustible.	TEMPÉRATURE DE LA COMBUSTION EN DEGRÉS CENTIGRADES				PUISSANCE calorifique du combustible en calories.
		Avec alimentation d'air théorique.	ALIMENTATION avec une fois et demie le poids d'air théorique.	ALIMENTATION avec deux fois le poids d'air théorique.	ALIMENTATION avec trois fois le poids d'air théorique.	
Hydrogène	36,00	3177	2127	1571	1060	29000
Pétrole	15,43	2788	1951	1488	1010	11500
Charbon de bois, Coke, Anthracite	12,13	2527	1768	1338	900	8050
Houille de Cumberland	12,06	2705	1849	1400	943	8540
Houille grasse collante	11,73	2838	1938	1582	988	8800
Houille grasse à longues flammes (Cannel-coal)	11,80	2677	1832	1393	938	8380
Lignite	9,30	2538	1766	1365	910	6520
Tourbe séchée au four	7,68	2466	1738	1327	905	5370
— séchée à l'air, contenant 25 0/0 d'eau	5,76	2204	1549	1227	843	4000
Bois séché au four	6,00	2249	1600	1238	832	4025
— séché à l'air, contenant 20 0/0 d'eau	4,80	2038	1490	1149	810	3110

Aucune indication n'est donnée à l'appui de ce tableau sur les conditions dans lesquelles les observations ont été faites et la méthode employée, mais il faut croire qu'elles ont dû être acceptées comme bonnes de l'autre côté de l'Atlantique puisque le professeur Thurston les présente dans son manuel des *Essais de de machines et chaudières à vapeur*. Ce sont évidemment des

Digitized by Google

températures théoriques, établies en supposant que la chaleur rayonnée par le combustible ne soit pas absorbée.

Pyromètres. — La mesure de la température d'un foyer à ses diverses allures n'a pas été jusqu'à présent l'objet d'expériences suffisamment certaines : le pyromètre thermo-électrique de M. Le Châtelier, d'invention récente, permettra certainement la réalisation de ces mesures. On peut cependant obtenir des observations suffisantes pour la pratique par l'emploi du pyromètre à azote, qui consiste en une sphère de platine (fig. 206) avec une ouverture capillaire dans une pointe effilée. Cette sphère, remplie d'azote, est revêtue d'une couche de terre à four pour la protéger, en laissant l'ouverture dégagée, et est ensuite placée dans le foyer dont on veut mesurer la température. Lorsqu'on suppose que l'équilibre de température est établi, on la retire et on la plonge pointe en bas dans un récipient contenant de l'eau, jusqu'à équilibre de température : on pèse alors le tout et le rapport entre le volume total de la sphère et le volume du gaz qui y est enfermé lors de la pesée donne par application du coefficient de dilatation des gaz, l'écart entre les températures absolues du foyer et de l'eau dans laquelle le pyromètre a été plongé.

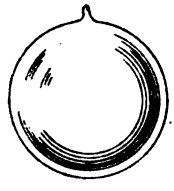


Fig. 206.

Le pyromètre thermo-électrique de M. Le Châtelier est un admirable instrument, malheureusement d'un prix d'achat et d'entretien trop élevé pour pouvoir être d'un emploi courant en industrie : il ne peut être employé que pour des installations fixes, dans des locaux à l'abri de toute trépidation.

Il se compose d'une canne métallique creuse, dans laquelle passent deux fils, l'un en platine pur, l'autre en platine rhodié. Ces fils dépassent de 1 à 2 centimètres le bout de la canne et une soudure à l'or les réunit à cette extrémité. Du côté de la poignée ils sont reliés à deux bornes métalliques, d'où partent deux fils en cuivre à un brin allant aux bornes d'un électro-aimant, entre les branches duquel est suspendu par deux fils capillaires un aimant permanent portant un petit miroir.

Digitized by Google

Celui-ci reçoit l'image d'une alidade et la réfléchit sur une règle transparente placée sur le même support qui porte la lampe éclairant l'alidade.

L'image étant amenée au 0 de l'échelle, si l'on introduit le bout de la canne dans un milieu chaud, un courant électrique, dont la faible intensité croît cependant avec l'élévation de température, se développe au point de soudure des deux fils de platine. L'électro-aimant déplace alors l'aimant permanent, dont le miroir fait dévier l'image de l'alidade sur l'échelle métrique. La lecture de ces déviations donne la mesure des températures des milieux dans lesquels on a plongé la canne.

A cet effet on a procédé au préalable à l'étalonnage du pyromètre en prenant pour points de repère trois températures connues et constantes. Cet étalonnage se fait très facilement dans les accessoires spéciaux qui accompagnent le pyromètre.

Connaissant ainsi les déviations en millimètres de l'image, qui correspondent :

1° A la fusion de l'or, 1 050° ;

2° A l'ébullition du soufre, 440° ;

3° A l'ébullition de la naphtaline, 210°, températures données par l'*Annuaire du Bureau des longitudes*, 1885, on les marque sur du papier millimétrique pour tracer la courbe dont les ordonnées sont les températures, et les abscisses la mesure des déviations. On fait passer une courbe par le 0 et les deux températures de l'ébullition de la naphtaline et du soufre ; on réunit par une droite le point de l'ébullition du soufre à celui de la fusion de l'or.

L'instrument une fois monté et étalonné, on relève avec précision et une très grande rapidité telles séries de températures qu'on se propose de rechercher ; il faut à cet effet ménager dans les parois du foyer et des carneaux des ouvertures *ad hoc* pour l'introduction de la canne.

Point de dissociation des corps composés. — Il paraît exister pour tout corps composé une température critique, à laquelle il se décompose en ses éléments constitutifs. Cette température, assez basse pour les encres sympathiques, va en croissant, par

Digitized by Google

exemple, pour le gypse, le carbonate de chaux, le sulfate de fer, etc. Cette propriété de dissociation des corps est employée dans la fabrication du gaz à l'eau, la vapeur d'eau étant décomposée par son passage sur une couche de combustible incandescent. Les températures critiques de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique n'ont pas été déterminées expérimentalement, mais elles sont très élevées. Contrairement à ce qu'on suppose, l'existence de cette limite montre que l'élévation des températures initiales de l'air et du combustible ne concourent pas à l'élévation de température du foyer par addition, et qu'elles peuvent au contraire, si elles sont très élevées, diminuer notablement la quantité de chaleur qui s'y dégagerait.

Caractères des combustibles usuels. — En dehors de leur puissance calorifique, les différents combustibles solides ont d'autres caractères, que nous allons passer rapidement en revue.

L'*anthracite* est le combustible qui contient la plus grande proportion de carbone et la plus faible proportion d'oxygène. En Europe, il n'est guère employé que pour les chauffages domestiques, mais en Amérique il est appliqué sur une grande échelle au chauffage des chaudières à vapeur.

C'est un combustible très dur, s'allumant à une très haute température, et exigeant un fort tirage, car il s'éteint facilement dès que l'arrivée d'air se ralentit : le chauffage à l'anthracite demande une attention très soutenue de la part du personnel de service.

Les *houilles* constituent le combustible le plus universellement employé pour la production de la vapeur d'eau. Leur composition élémentaire varie dans les limites ci-après :

Carbone	75 à 93 p. 100
Hydrogène	6 à 4 —
Oxygène et azote	19 à 3 —

La valeur d'une houille dépend : 1° de son pouvoir calorifique ; 2° de sa cohésion ou de sa friabilité ; 3° de la quantité et de la nature des cendres, suivant qu'elles sont ou non fusibles et

Digitized by Google

que par suite elles donnent ou ne donnent pas de mâchefer ; 4° du pouvoir agglomérant du combustible au feu.

M. Grüner divise les houilles en cinq types :

	COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE			RAPPORT $\frac{O}{H}$	CHARBON fourni à la distillation.	NATURE et aspect des charbons.
	C	H	O			
Houilles sèches à longue flamme. . . .	75 à 80	5,5 à 4,5	19,5 à 15	4 à 3	0,50 à 0,60	Pulvérulent ou tout au plus fritté.
Houilles grasses à longue flamme (houilles à gaz)	80 à 85	5,8 à 5	14,2 à 10	3 à 2	0,60 à 0,68	Fondu, mais très fendillé.
Houilles grasses proprement dites ou charbon de forge. .	84 à 89	5 à 5,5	11 à 5,5	2 à 1	0,68 à 0,74	Fondu, moyennement compact.
Houilles grasses à courte flamme ou charbons à coke. .	88 à 91	5,5 à 4,5	6,5 à 5,5	1	0,74 à 0,82	Fondu, très compact, peu fendillé.
Houilles maigres ou anthraciteuses. . .	90 à 93	4,5 à 4	5,5 à 3	1	0,82 à 0,90	Fritté ou pulvérulent.

Les *houilles sèches* sont compactes, dures, peu friables ; leur densité est environ 1,5 ; le poids du mètre cube est de 700 kilogrammes ; leur cassure est conchoïdale, unie, plus ou moins esquilleuse ; de là le nom de *splint-coal* que leur donnent les Anglais : leur couleur est rarement d'un noir pur, leur poussière est brune ; ce sont des charbons *flambants*.

Leur puissance calorifique, d'après M. Scheurer-Kestner, est en moyenne de 8 200 à 8 300 calories ; celles qui sont plus rapprochées des lignites donnent 8 000, et celles qui se rapprochent des charbons gras donnent 8 500 calories.

Houilles grasses à longue flamme ou charbons à gaz. — Ces houilles, étant distillées, s'agglutinent en une masse unique plus ou moins poreuse ; elles sont encore dures, tenaces, mais moins que les précédentes ; en Angleterre, on les appelle *Cherry-Coal ;* leur densité est comprise entre 1,28 et 1,50 ; elles sont faciles à enflammer et brûlent rapidement avec flamme et sans fumée ; elles sont *flambantes ;* ce sont des houilles à gaz.

Digitized by Google

Leur puissance calorifique, à l'état pur et sans eau, est comprise entre 8 500 et 8 800 calories d'après MM. Scheurer-Kestner et Meunier.

Houilles grasses proprement dites, ou charbons de forge. — Elles sont noires, d'un éclat vif, peu dures ; leur structure est plus ou moins feuilletée et lamelleuse ; elles donnent une flamme moins longue, moins enfumée, douée de plus d'éclat que les deux types précédents ; elles se ramollissent complètement au feu comme la résine et le brai, et se gonflent fortement ; le menu s'agglutine en masse compacte, forme voûte dans le foyer de la forge, d'où les appellations de *fine-forges, maréchales;* elles donnent de bons cokes, de là les noms de charbons *collants, calking-coal* (anglais), *back-kohle* (allemand).

La densité moyenne est de 1,30. Le poids du mètre cube des morceaux est de 750 à 800 kilogrammes.

La puissance calorifique de ces houilles pures est de 8 800 à 9 300 calories, d'après les déterminations faites par M. Scheurer-Kestner.

Houilles grasses à courte flamme ou charbons à coke. — Elles ont même texture que les précédentes avec un éclat moins vif ; elles sont souvent striées de bandes alternativement brillantes et ternes ; leur densité varie de 1,30 à 1,35 ; le poids du mètre cube de morceaux est de 800 kilogrammes ; elles s'enflamment difficilement, en donnant une flamme peu étendue.

Les houilles grasses à courte flamme ont la puissance calorifique la plus élevée, elle varie de 9 300 à 9 600 calories.

Houilles maigres ou anthraciteuses. — Elles sont noires, striées, ternes, leur cohésion est faible, mais tend à croître en se rapprochant des anthracites compactes. Leur densité est de 1,35 à 1,40 ; le poids du mètre cube est de 850 kilogrammes ; elles s'enflamment difficilement, leur flamme est courte, de peu de durée, ne donne pas de fumée ; elles décrépitent souvent, ce qui en rend l'emploi difficile.

Leur pouvoir calorifique est de 8 800 à 9 500 calories, d'après M. Scheurer-Kestner.

Toutes les puissances calorifiques qui précèdent se rappor-

Digitized by Google

tent à la houille pure, c'est-à-dire supposée sans eau ni cendres.

Les *lignites*, qui viennent à la suite des houilles dans l'ordre décroissant comme composition élémentaire et âge géologique, sont employés comme combustible surtout dans le sud-est de la France. Les lignites imparfaits, qui présentent encore la structure végétale, sont employés plus rarement. Leur valeur comme combustible est intermédiaire entre la houille et le bois ; elles contiennent généralement un pourcentage élevé d'eau et de cendres.

La *tourbe* est un combustible léger, spongieux, d'un brun noirâtre. Elle est formée de plantes herbacées, entrelacées, souvent reconnaissables, et dont la décomposition est plus ou moins avancée. Les tourbes renferment toujours une certaine quantité d'eau, de terre et de sable.

La tourbe provient sans aucun doute des débris de plantes aquatiques déposés successivement au fond des marais ; mais comme tous les marais ne renferment pas de la tourbe, il faut nécessairement admettre que sa formation exige ou des espèces particulières de végétaux ou des circonstances qui ne se rencontrent pas partout.

La tourbe brûle lentement et sans produire une très haute température, avec une fumée d'une odeur piquante fort désagréable. Les produits de la combustion de la tourbe sont assez complexes, parce qu'il est difficile de la rendre parfaite. Ils sont composés des mêmes éléments que ceux qui se dégagent de la combustion incomplète du bois ; on y trouve en outre de l'ammoniaque et de l'acide sulfureux.

La tourbe est généralement desséchée au soleil, et est consommée sur place ou dans un faible rayon : séchée au four et comprimée, elle a reçu en Allemagne des applications assez étendues au chauffage des locomotives.

Le *bois* n'est employé comme combustible dans les foyers des générateurs de vapeur que dans la proximité d'exploitations forestières ayant le plus souvent pour principal but le déboisement, ou lorsqu'on en dispose sous forme de déchets de fabrication. Lorsqu'on emploie le bois comme combustible, on a avantage à le

Digitized by Google

faire dessécher dans une étuve, sa puissance calorifique dépendant surtout de son état hygrométrique.

Le *coke* et la *briquette* sont deux combustibles dérivés de la houille. Le premier est le résidu de la distillation de celle-ci, et ses propriétés dépendent de la qualité de la houille dont il est tiré ainsi que des procédés de sa fabrication. Le coke absorbe l'eau avec une très grande rapidité, et il y a avantage à l'emmagasiner dans un endroit sec et ventilé lorsqu'il doit être employé au chauffage d'un générateur. A l'origine des chemins de fer, le coke était exclusivement employé en France et en Angleterre pour le service des locomotives.

L'emploi du coke est aujourd'hui limité aux installations de générateurs pour lesquelles on prescrit une absence complète de fumée visible, telles les grandes usines électriques établies aux centres même d'une ville. Le prix élevé du coke excepté là où il forme un sous-produit de fabrication, n'en fait pas un combustible industriel.

La *briquette* est un combustible artificiel formé de poussier de charbon aggloméré avec du goudron et du brai, et autres déchets de combustibles. Sa fabrication est très développée en Europe, car elle permet d'utiliser sous une forme pratique et commode des produits d'un emploi difficile sinon impossible. Les briquettes sont fortement comprimées, et forment un combustible brûlant lentement, s'enflammant à basse température, et donnant un dégagement de chaleur régulier et continu ; elles forment le combustible par excellence pour les générateurs de vapeur si elles sont d'une fabrication consciencieuse. La composition élémentaire de la briquette est de 80 à 85 p. 100 de carbone, 4 à 5 p. 100 d'hydrogène, 5 p. 100 d'autres matières volatiles et 5 à 8 p. 100 de cendres.

Leur puissance calorifique dans ces conditions est celle de la meilleure houille : la briquette d'Anzin, qualité marine, d'extraction fraîche, est pour la France le combustible type pour la production de la vapeur.

Le genre de combustible employé au chauffage industriel des chaudières est déterminé parfois par des circonstances locales et des convenances particulières, totalement indépendantes des

Digitized by Google

caractéristiques du combustible. Mais d'une façon générale le prix de la tonne de vapeur en combustible brûlé est la plus importante des considérations dans le choix d'un combustible.

Chauffage. — La pratique du chauffage ne s'obtient qu'à la longue, et ce n'est que par une série non interrompue d'observations qu'un chauffeur, même expert dans son métier, parviendra à connaître les conditions les plus favorables à l'économie du combustible employé, suivant le type et les conditions d'installation d'un générateur. C'est ainsi que souvent dans les concours de chauffeurs, le prix n'est pas décerné au plus habile, mais à celui dont le mode habituel de chauffage s'adaptait le mieux à l'appareil d'essai. Sur un même appareil conduit par des chauffeurs habiles l'écart de production ou d'utilisation s'élève parfois à plus de 20 p. 100, suivant le chauffeur.

En règle générale le charbon, qui est le combustible le plus employé, doit être chargé en couche uniforme sur toute l'étendue de la grille : les gros morceaux seront cassés en fragments du volume d'un œuf à peu près : les menus et le poussier seront étalés en couche très mince aux endroits où la combustion est la plus vive.

Le mélange intime et uniforme des matières volatiles du charbon et de l'oxygène de l'air est une condition indispensable pour la combustion parfaite de ces gaz. Le renversement des flammes sur l'autel produit un mélange, imparfait il est vrai, des matières volatiles et de l'air, et donne de ce fait une combustion préférable à celle qui a lieu lorsque les gaz s'élèvent verticalement au-dessus de la grille. L'air qui traverse la couche de combustible se charge d'acide carbonique ou d'oxyde de carbone et devient pauvre en oxygène ; il est nécessaire de l'admettre en excès pour que les matières volatiles soient rapidement mises en contact avec l'agent de la combustion.

L'uniformité de la couche a une importance capitale, car si le charbon n'est pas d'une espèce se ramollissant au feu, les creux brûlent avec une grande vivacité, l'air y rencontrant une moindre résistance : il s'y forme bientôt un trou par lequel l'air s'engouffre en excès sans produire d'effet utile. En même temps une

Digitized by Google

bien moindre quantité d'air passe entre les interstices du charbon là où la couche est épaisse, et la combustion s'y ralentit. En chargeant une grille en cet état, les creux recevront une couche plus épaisse de combustible frais : l'inverse se produit alors : la combustion sera plus vive là où la couche primitive était plus épaisse et une dépression s'y formera suivie d'un trou.

Lorsqu'on emploie des charbons gras, se ramollissant au feu, la houille s'étale d'elle-même et cet inconvénient disparait pour faire place à un autre, car en s'étalant le combustible vient boucher les passages d'air entre les barreaux de grille.

Pour qu'un chauffeur puisse bien surveiller son feu et reconnaître rapidement les vides pour les niveler, l'emploi de lunettes vertes est à recommander, surtout si le foyer est à allure vive.

La question de l'épaisseur à donner à la couche de combustible n'a pas encore reçu en pratique de solution satisfaisante. Plus la couche sera mince, moins grande sera la résistance au passage de l'air et plus vive la combustion, mais pour obtenir ce résultat le chargement doit être fait à des intervalles très rapprochés et par petites quantités à la fois : l'introduction d'air froid par la porte du foyer devient par ce mode de chargement très importante, et il est alors indispensable de baisser le registre à chaque chargement : deux hommes seraient nécessaires pour la conduite d'un foyer, car le service serait trop fatigant pour un seul chauffeur ; on a essayé d'y remédier en reliant le registre à la porte du foyer, dispositif qui ne supprime pas les efforts demandés au conducteur et qui de ce fait s'est fort peu répandu.

Les feux épais, avec grosses charges, offrent l'avantage d'exiger l'ouverture de la porte du foyer à des intervalles éloignés, et diminuent les inconvénients des rentrées d'air froid : mais ces feux distillent d'un coup des quantités considérables de matières volatiles, parfois à température trop basse pour pouvoir s'enflammer, même en admettant de l'air au-dessus de la grille par la porte du foyer entr'ouverte.

Une moyenne se présente naturellement à l'esprit dans ces conditions, et les feux de 10 à 15 centimètres d'épaisseur sont ceux qui paraissent les plus faciles à conduire, surtout si la grille est suffisamment large pour permettre la charge alternée de chacune

Digitized by Google

de ses moitiés par deux portes distinctes. Ce système de charges alternées paraît donner en pratique les meilleurs résultats. Les matières volatiles distillées par la moitié chargée de charbon frais, peuvent se mélanger à de l'air à haute température admis par la moitié de la grille qui est en pleine combustion, et si les flammes sont couchées vers l'autel suivi d'une chambre de combustion et de brassage, on obtiendra les meilleurs résultats pratiques avec l'emploi des houilles maigres.

Si au contraire on emploie des houilles grasses, le meilleur procédé consiste à charger la grille par moitié transversale, la charge fraîche étant faite sur la moitié avant, et le charbon ramené à l'arrière au moment de la charge suivante. En admettant dans ces conditions une certaine quantité d'air par la porte du foyer, les matières volatiles mélangées à cet air s'enflamment en passant sur la partie arrière de la grille en pleine combustion. Ce mode de chauffage convient particulièrement aux grilles longues, mais son inconvénient est de renvoyer au fond toutes les scories et mâchefers, d'où il est malaisé de les enlever.

Admission d'air au foyer. — D'une façon générale il est reconnu qu'une certaine quantité d'air doit être admise au-dessus des grilles : M. Ch. W. Williams (*Considération sur la Combustion du Charbon*) a été le champion de cette très juste théorie, qu'il a développée avec une certaine prolixité : il conseille de préférence, d'après ses nombreuses expériences, l'admission par autel cloisonné.

Il faut ici remarquer, que si la charge de combustible était uniforme et constante, il serait facile de régler les ouvertures d'admission d'air par ailleurs que la grille, pour en déterminer assez exactement le volume et le proportionner à celui des gaz distillés : mais cela est impossible en pratique, et tout dispositif de ce genre admettra forcément une quantité d'air insuffisante lorsqu'il sera nécessaire, un trop grand volume lorsqu'il sera nuisible. La fumée et la combustion incomplète sont non seulement la conséquence d'un manque d'air, mais aussi celle d'un excès d'air, par l'abaissement de température qui se produit.

Le mode de chargement par moitié à l'avant sur une grille

Digitized by Google

étroite et longue, que nous avons indiqué plus haut, est celui qui s'accommode le mieux avec une admission d'air par la porte du foyer, en la limitant à la première moitié du temps qui sépare deux chargements successifs.

Grilles. — Les dispositions de grilles pour assurer une bonne combustion des houilles ont formé l'objet d'un nombre incalculable de brevets dans tous les pays industriels : mais les résultats de tous ces systèmes plus ou moins compliqués ont été des moins satisfaisants, et c'est à la grille primitive de nos pères qu'on

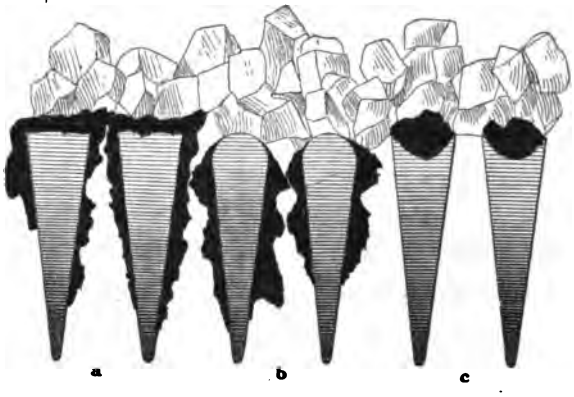


Fig. 207.

revient toujours. Si le combustible employé est gras, et qu'on admette de l'air au-dessus de la grille, les barreaux offrant une section libre du tiers de la surface totale donneront les meilleurs résultats. Avec des houilles maigres non collantes, des feux minces, à charges alternées, sans admission directe d'air dans le foyer, les barreaux minces avec vides égaux aux pleins seront employés avec succès, mais il convient toujours de leur donner une grande hauteur, pour augmenter leur surface de refroidissement.

L'enlèvement des mâchefers et des scories, *décrassage* en termes du métier, est l'opération la plus pénible du service de chauffe. Ces résidus sont formés par les cendres qui s'accumulent sur les barreaux, et dont la proportion dans les houilles varie de 3 à 20 p. 100 ; elles se composent principalement de silice, alu-

Digitized by Google

mine, oxydes de chaux et de fer, fondent sous l'action de la chaleur en s'attachant aux barreaux, et en s'agglomérant viennent obstruer complètement les passages d'air en troublant ainsi profondément l'allure du foyer. Portés à une haute température, les mâchefers *collent* aux barreaux, desquels il est parfois très difficile de les détacher.

Les grilles oscillantes peuvent rendre dans le cas de charbons encrassants de réels services. En Amérique on emploie avec succès un modèle de barreau à gorge, pour lequel on revendique comme avantage que le mâchefer loin de le détériorer le protège contre une élévation de température anormale, et n'y colle pas. La figure 207 représente l'agglomération des mâchefers en *c* sur ce dernier genre de barreaux et en *a* et *b* sur des barreaux ordinaires neufs ou à arêtes rongées par l'usage ; ceux-ci s'obstruent plus facilement, car le mâchefer fondu coule facilement sur les faces et vient se fixer entre les interstices.

Analyse des produits de la combustion. — Le seul moyen de contrôle des conditions dans lesquelles s'effectue la combustion d'un foyer est l'analyse sommaire des gaz qui s'y dégagent. Nous disons sommaire, car, d'une façon générale, on n'y recherche le dosage que de l'acide carbonique, de l'oxygène libre et de l'oxyde de carbone.

Les houilles contiennent de l'hydrogène, de l'oxygène et du soufre ; une analyse complète exigerait le dosage des hydrocarbures non brûlés, de l'acide sulfureux et de la vapeur de l'eau de constitution et de l'eau hygrométrique.

Le dosage des trois gaz CO^2, O et CO permet de trouver le poids d'air employé pour la combustion de l'hydrogène libre et du soufre : l'analyse du charbon indiquera l'eau de constitution, et la dessiccation d'un poids déterminé de combustible l'eau hygrométrique. Il ne resterait donc à doser que les hydrocarbures, mais c'est là une opération délicate et compliquée, dont le résultat serait sans valeur pour la généralité des cas industriels.

Même sans l'analyse du combustible, on tiendra suffisamment compte de la vapeur d'eau contenue dans les produits de la com-

Digitized by Google

bustion en prenant comme chaleur spécifique de ces gaz 0,25 calorie par degré.

L'*appareil d'Orsat* est communément employé pour le dosage des trois gaz : CO^2, O et CO ; il se compose d'un flacon gradué dans lequel on aspire 100 centimètres cubes de gaz, qu'on fait ensuite passer successivement dans trois autres flacons contenant les réactifs : dissolution saturée de potasse et de soude pour absorber l'acide carbonique ; dissolution de pyrogallate de potasse pour séparer l'oxygène ; dissolution de protochlorure de cuivre ammoniacal pour doser l'oxyde de carbone.

Après un certain nombre de passages dans les flacons à réactifs, le gaz ramené dans la burette graduée donne par la lecture de la diminution de son volume le pourcentage du corps absorbé. Le gaz à analyser doit passer dans le flacon à réactif dans l'ordre indiqué ci-haut, car le pyrogallate de potasse absorbe CO^2 et O, et le protochlorure de cuivre O et CO.

L'appareil d'Orsat est excellent lorsqu'il ne s'agit que de doser CO^2 et O ; il laisse beaucoup à désirer pour le dosage de l'oxyde de carbone ; l'absorption de ce gaz par le protochlorure de cuivre ammoniacal est accompagnée d'un dégagement de vapeurs d'ammoniaque ; celles-ci occupent souvent un volume plus considérable que celui de l'oxyde de carbone absorbé. En outre, le protochlorure de cuivre est un corps très instable ; dans l'appareil d'Orsat on compte sur sa régénération immédiate, alors qu'il faut environ quarante-huit heures pour que celle-ci puisse s'effectuer ; le réactif, rapidement transformé, perd son pouvoir absorbant : c'est ainsi que l'appareil d'Orsat accuse toujours des combustions beaucoup plus complètes qu'elles ne le sont en réalité.

Un autre inconvénient de cet appareil est de ne pas permettre les lectures des volumes sous pression constante : on doit ramener la pression à la main, d'où source d'erreur. Enfin on n'y analyse les produits de la combustion qu'avec leur composition pendant les instants qui précèdent immédiatement l'opération. Or cette composition se modifie dans des limites très étendues, à tout moment, suivant l'état de la couche de combustible sur la grille et les variations d'ouverture du registre. Il y a intérêt majeur à n'opérer que sur des gaz donnant la composition moyenne des

Digitized by Google

produits de la combustion pendant un intervalle de temps assez long, trente minutes ou une heure.

La *Burette de Bunte* supprime tous ces inconvénients; elle permet le mesurage des gaz après chaque absorption sous pression constante : la pression atmosphérique augmentée d'une colonne d'eau de hauteur fixe. Les manipulations sont plus longues; environ une demi-heure pour chaque analyse complète, alors qu'avec l'appareil Orsat elle est faite en cinq minutes. Mais comme on peut analyser avec la burette de Bunte des gaz d'une composition moyenne, on a tout le temps nécessaire aux manipulations pendant que le flacon de prise se remplit du gaz pour l'opération suivante.

Les réactifs sont introduits dans la burette même qui contient le gaz à analyser, et où celui-ci a été au préalable détendu.

Après absorption, la burette est lavée intérieurement à l'eau courante, et le gaz ramené pour la lecture à la pression originelle.

Après l'absorption de l'oxyde de carbone, l'eau de lavage absorbe les vapeurs ammoniacales : ce gaz peut ainsi être dosé avec certitude et... on en trouve presque toujours, à moins que la combustion ne s'effectue avec des excès d'air considérables.

L'analyse des produits de la combustion est une opération délicate, dont il faut acquérir l'habitude ; on pourra consulter à ce sujet le *Manuel Pratique de l'analyse industrielle des Gaz*, par C. Winkler (Paris, Savy, éditeur) ; on y trouvera la description détaillée des différents appareils et la manière de s'en servir.

Poids des produits de la combustion. — A l'aide du poids de combustible brûlé et de l'analyse des gaz, on peut déterminer le poids des produits de la combustion : la mesure de leur température, au moment où ils quittent les surfaces de chauffe, permettra de calculer la quantité de chaleur inutilisée, emportée par ces gaz.

Voici une méthode sommaire de calcul, très suffisante pour tous les cas de la pratique.

Prenons, à titre d'exemple, une série d'analyses ayant donné comme moyenne :

CO^2	O	CO	Az
14 p. 100	5 p. 100	0,6 p. 100	80,4 p. 100

Digitized by Google

Un kilogramme de carbone exige, en chiffres ronds, 12 kilogrammes d'air pour être transformé en CO^2, et 6 kilogrammes d'air pour être transformé en CO.

Nous aurons donc :

$$1^\circ \text{ En poids } \begin{cases} 1^k\ C + 12^k \text{ air} = 3^k,667\ CO^2 + 9^k,333\ Az \\ 1^k\ C + 6^k \text{ air} = 2^k,333\ CO + 4^k,667\ Az \end{cases}$$

$$2^\circ \text{ En volumes } \begin{cases} 1 \text{ vol. } C + 2 \text{ vol. } O = 2 \text{ vol. } CO^2 \\ 1 \text{ vol. } C + 1 \text{ vol. } O = 2 \text{ vol. } CO. \end{cases}$$

Dans le cas des analyses ci-dessus on a employé pour la combustion d'un kilogramme de carbone :

$$\frac{7 \times 2 + 0,3 \times 6}{7,3} = 11^k,767 \text{ d'air.}$$

plus le poids correspondant aux 5 volumes d'oxygène en excès :

$$\frac{11,767 \times 5}{14,3} = 4^k,114 \text{ d'air.}$$

Le poids total de l'air pour un kilogramme de carbone est donc d'après l'analyse de :

$$11^k,767 + 4^k,114 = 15^k,881.$$

L'air contient en volumes 0,205 O et 0,782 Az : le volume d'azote correspondant aux 19,3 volumes O de l'analyse est de :

$$\frac{19,3 \times 78,2}{20,5} = 73,6 \text{ volumes.}$$

Il y a donc excès de 80,4 — 73,6 = 6,8 volumes d'azote, et en poids pour un kilogramme de carbone.

$$\frac{15,881 \times 6,8}{73,6} = 1^k,467 \text{ air.}$$

Le poids de l'oxygène étant 0,228 du poids de l'air, la quantité ci-dessus contenait $0^k,335$ O, qui se sont combinés à $\frac{0,335}{8} = 0^k,042$ d'hydrogène, ceci, bien entendu, en négligeant le soufre et les hydrocarbures non brûlés.

Nous en déduirons que le kilogramme de combustible employé, à l'état pur, déduction faite de son eau de constitution, contenait :

$$\frac{1 \times 0,042}{1,042} = 0^k,040 \text{ H.}$$

Digitized by Google

Il a donc été employé pour la combustion d'après l'analyse :

Carbone	$15^k,881 \times 0^k,960 =$	$15^k,246$ air.
Hydrogène libre.	$1^k,467 \times 0^k,04 =$	$1^k,395$ air.
Poids du combustible.		1^k
Poids des gaz pour 1 kilogr. de combustible sec et pur. . .		$17^k,641$

La puissance calorifique théorique de ce combustible d'après sa teneur en carbone et hydrogène libre est de :

$$\begin{array}{lr} 0^k,04\ H \times 29\,000 = & 1\,160 \text{ calories.} \\ 0^k,96\ C \times 8\,100 = & 7\,776 \quad — \\ \hline & 8\,836 \text{ calories.} \end{array}$$

Mais à cause de la production d'oxyde de carbone, elle n'aurait été d'après l'analyse que de :

$$\begin{array}{lr} & 0^k,04\ H \times 29\,000 = \quad 1\,160 \text{ calories.} \\ (CO^2) & \dfrac{0^k,96\ C \times 8\,100 \times 7}{7,3} = 7\,306 \quad — \\ (CO) & \dfrac{0^k,96\ C \times 2\,583 \times 0,3}{7,3} = \quad 10 \quad — \\ \hline & 8\,476 \text{ calories.} \end{array}$$

La température ambiante était pour le cas qui nous occupe de 19° et la température moyenne des gaz en quittant les surfaces de chauffe de 390°. La chaleur emportée par les gaz de la combustion a donc été de :

$$(390 - 19) \times 17,641 \times 0,25 = 1\,636 \text{ calories,}$$

c'est-à-dire 19,3 p. 100 de la chaleur dégagée dans le foyer.

Il est ici utile de remarquer que dans le cas examiné ci-dessus, la combustion s'est effectuée dans d'excellentes conditions, qu'on rencontre rarement en pratique. Un excès d'air plus considérable aurait donné une température initiale moindre au foyer et plus basse à la sortie des gaz. Mais comme le poids des gaz eût été plus considérable, le nombre de calories emportées par eux à la cheminée se serait probablement accru. Ce qui précède démontre combien peu d'importance il faut attacher aux relevés de températures des gaz à la base des cheminées ; pour connaître l'efficacité des dispositions adoptées pour les surfaces de chauffe d'une chaudière, il importe de connaître la tempé-

Digitized by Google

rature des gaz à la limite de ces surfaces, et leur analyse exacte.

Causes de la combustion imparfaite. — Une combustion parfaite ne doit produire que de l'acide carbonique, de l'azote et de la vapeur d'eau, mais l'analyse des gaz s'échappant à la cheminée révèle toujours une certaine quantité d'oxyde de carbone et un excès d'oxygène provenant de l'air non brûlé. Cette combustion imparfaite est une des principales causes de la perte dans la transformation de l'énergie de la houille en vapeur d'eau, dont les autres éléments sont la quantité de chaleur emportée par les produits du foyer et le rayonnement du massif du fourneau ou de l'enveloppe du générateur. La perte atteint souvent 40 et 50 p. 100 de la puissance calorifique de la houille, même en ne tenant compte que de la vaporisation apparente : elle est toujours plus élevée si l'on a pu exactement contrôler l'eau entraînée et obtenir la vaporisation réelle. Cette combustion imparfaite peut provenir de deux causes : 1° manque ou excès d'air, avec mauvais brassage des gaz ; 2° même si une bonne combustion a été amorcée, elle peut être interrompue avant qu'elle ne soit complétée, par le refroidissement des flammes au contact des surfaces de chauffe.

En plongeant une barre métallique dans une flamme lumineuse, on voit que la combustion cesse dans toute la zone de la flamme en contact avec la surface de la barre, qui se trouve environnée d'une couronne obscure, diminuant petit à petit pour disparaitre dès que la température du métal est en équilibre avec celle de la flamme.

Le professeur Vivian B. Lewes, du Royal Naval College (*The Engineer*, avril 1894), a analysé les produits de la combustion du gaz d'éclairage, en chauffant de l'eau dans un vase métallique, et en faisant frapper la surface de chauffe par la flamme en plein ou par son extrémité. Des précautions très minutieuses étaient prises, pour être certain de l'exactitude des résultats. Les expériences, faites avec un bec ordinaire, ont été repétées avec un bec Bunsen.

Digitized by Google

ANALYSE DES PRODUITS DE LA COMBUSTION

Flamme ordinaire.	Chauffage en plein.	Chauffage au sommet.
Azote	77,52	69,41
Vapeur d'eau	11,80	19,24
Acide carbonique	4,93	8,38
Oxyde de carbone	2,45	2,58
Hydrogène protocarburé	0,95	0,39
Acétylène	0,27	0,00
Hydrogène	2,08	0,00
	100,00	100,00
Flamme Bunsen.		
Azote	75,75	79,19
Vapeur d'eau	13,47	14,39
Acide carbonique	2,99	5,13
Oxyde de carbone	3,69	0,00
Hydrogène protocarburé	0,51	0,41
Acétylène	0,04	0,00
Hydrogène	3,55	0,48
	100,00	100,00

Si la combustion n'est pas achevée lorsque les flammes viennent en contact avec les surfaces de chauffe du générateur, il y a donc une perte considérable due à la présence des gaz non brûlés dans la flamme éteinte : souvent les gaz s'enflamment dans les carneaux à la sortie de la chaudière, dès qu'ils ne sont plus en contact avec les surfaces refroidissantes du générateur. Les tôles de coup de feu sont ainsi recouvertes d'une couche mince de gaz froids, empêchant par leur mauvaise conductibilité l'absorption de la chaleur des autres couches gazeuses à haute température et occasionnant une perte de combustible à un double point de vue.

M. Lewes fait remarquer qu'un constructeur d'appareils de chauffage au gaz, M. Fletcher de Wanington, a reconnu cet inconvénient dans ses appareils de cuisine et y a apporté remède en fixant sur le fond de ses casseroles ou bouillottes des chevilles extérieures, lesquelles, plongées dans la flamme, acquièrent une température assez élevée pour réenflammer les gaz éteints par les parois au contact du liquide : l'effet utile d'un même appareil est augmenté de 40 p. 100 par l'adjonction de chevilles extérieures.

Digitized by Google

C'est ainsi qu'on peut expliquer l'anomalie qui se présente en pratique dans les puissances de vaporisation de la houille et du coke. Celui-ci ne donnant pas de flamme, vaporise la même quantité d'eau que la houille, dont les flammes sont éteintes avant que la combustion ne soit achevée.

La chaudière à foyer en maçonnerie assure donc de ce chef une meilleure combustion que celle à foyer métallique, et une plus grande absorption par contact avec les gaz chauds : mais le foyer intérieur profite de tout le rayonnement. Les deux avantages ou désavantages se compensent, ce qui fait qu'en pratique les résultats des deux systèmes sont analogues.

Parties saillantes sur les surfaces de chauffe. — Dans l'ouvrage de sir Williams, sur la combustion de la houille, se trouvent des expériences qui confirment ce qui précède sur l'influence des appendices. Trois vases métalliques pleins d'eau, de même forme et de mêmes dimensions, étaient traversés chacun par un tuyau horizontal rectangulaire, de même surface pour les trois vases ; ces tuyaux communiquaient par un bout avec un bec de gaz, et par l'autre avec une cheminée ; le premier tuyau était libre dans toute son étendue ; le second portait à l'intérieur un certain nombre de pointes métalliques perpendiculaires à la surface ; le troisième renfermait le même nombre de pointes, mais disposées à l'extérieur et à l'intérieur. En brûlant dans les becs, les mêmes volumes de gaz, dans le même temps, la quantité d'eau évaporée dans le premier vase a été de $2^k,210$; dans le second, $3^k,571$; et dans le dernier $3^k,770$.

Cette idée a été reprise dans le tube Serve à ailettes longitudinales, dont de nombreuses applications viennent d'être réalisées en Marine et sur les Chemins de fer. Ces tubes augmentent l'efficacité de la surface de chauffe en mettant le métal en contact avec des couches de gaz chauds dont l'action serait autrement perdue. Leur principal inconvénient est de s'obstruer beaucoup plus rapidement que les tubes cylindriques ordinaires par les accumulations des cendres. Toutefois ce dispositif ne saurait avoir aucune influence sur le phénomène étudié par le professeur Lewes

Digitized by Google

car les parties saillantes ne sont pas dans le foyer, et ne sauraient réenflammer des gaz éteints[1].

Températures d'inflammation. — Ainsi la chaudière pourra être perfectionnée au point de vue de la combustion totale des flammes dans le foyer, par des artifices du genre de ceux que nous venons d'examiner. Nous croyons dans ce but intéressant de reproduire ici les températures d'inflammation des quelques corps qui nous intéressent :

Poussier de lignite	160°
Tourbe séchée	225
Poussier d'anthracite	300
Houille	320
Coke	325
Anthracite	400
Hydrogène	550 à 700°
Suie	650
Oxyde de carbone	655

Allure des grilles. — La question des grandes et des petites grilles, c'est-à-dire des foyers à allure lente ou vive, a été l'objet de nombreuses discussions dès l'origine des applications industrielles de la vapeur d'eau, et n'a pas encore reçu une solution bien nette. Il est impossible de tirer des essais faits dans ce but par des intéressés aucune conclusion, car il aurait fallu pour cela des expériences comparatives, sur le même appareil, par un même chauffeur, aussi habile pour l'une comme pour l'autre allure de combustion, et surtout mesurer d'une façon rigoureuse les quantités d'eau entraînées mécaniquement dans les deux cas; ce dernier contrôle peut seul être facilement réalisé d'une façon certaine en mesurant, par le même appareil, la transformation en travail de l'énergie d'un kilogramme de combustible.

Nous avons toujours été partisan des petites grilles brûlant 100 kilogrammes de houille par mètre carré et par heure : celles-ci ont l'avantage de pouvoir être plus facilement garnies dans des conditions normales, et de ne pas laisser passer un trop grand

[1] On trouvera les résultats de nombreux essais comparatifs sur les tubes lisses et les tubes Serve dans l'*Etude de la Vaporisation sur les Chaudières de Locomotives*, par A. Henry; voir aussi l'*Etude sur la combustion*, par C. Chômienne.

Digitized by Google

excès d'air : l'allure vive du foyer en augmentant la température des flammes et du combustible, accroît l'écart de température avec les surfaces de chauffe et la quantité de chaleur transmise ; la plus grande vitesse d'accès d'air en travers de la couche du combustible est aussi une cause de mélange plus intime avec les matières volatiles.

Pertes par la cheminée. — Les questions relatives aux allures des foyers sont intimement liées à celles relatives au tirage, les volumes d'air appelés étant en rapport de la différence de charge entre la colonne des gaz qui remplissent la cheminée et celle d'air atmosphérique extérieure, diminuée dans une très grande proportion par la résistance de la grille, les frottements dans les carneaux et les changements de direction dans le courant des produits de la combustion.

La quantité de charbon perdue par des cheminées est en général considérable, car les produits de la combustion s'échappent à une température très élevée, de 100° à 150° supérieure à celle de la chaudière. Les pertes en calories, d'après Péclet, peuvent atteindre parfois 30 p. 100 du combustible consommé sur la grille.

S'il était possible de régler l'admission d'air au volume strictement nécessaire à la combustion parfaite, cette perte pourrait s'abaisser à 5 ou 10 p. 100 suivant la nature des combustibles employés. MM. Scheurer-Kestner et Meunier, dans leurs expériences sur la puissance calorifique des houilles, ont obtenu une moyenne de 8 p. 100 avec un excès d'air de 33 p. 100, mais les conditions dans lesquelles ils ont opéré ne se rencontrent pas dans la pratique, et l'on peut admettre que le minimum de combustible dépensé pour obtenir le tirage au moyen d'une cheminée, est de 20 p. 100 du poids consommé sur la grille [1].

Tirage naturel. — Quand la température des gaz dans une cheminée reste constante, et que la température extérieure s'élève ou s'abaisse, le tirage diminue ou augmente. Mais l'influence de ces variations se fait sentir principalement sur les phénomènes

[1] Voir page 434.

Digitized by Google

qui se produisent dans le foyer. La combustion est d'autant plus active, il y a d'autant moins d'air qui échappe à la combustion, qu'il a une plus grande densité, et en outre, pour brûler la même quantité de combustible, il faut un moindre volume d'air froid que d'air chaud. Ainsi, tout concourt à rendre le tirage des cheminées plus grand en hiver.

En supposant les gaz à la même température dans la cheminée, lorsque l'air extérieur est à différentes pressions, la vitesse d'écoulement resterait la même, si la combustion restait la même ; seulement le poids de l'air appelé diminuant avec la pression dans un même appareil, on brûlerait des quantités de combustible qui varieraient proportionnellement à la presion extérieure. L'influence des variations du baromètre se manifeste principalement dans les foyers ; la combustion est d'autant moins vive, il s'échappe d'autant plus d'air non brûlé que la pression extérieure est plus faible. Cette influence est si grande que, quand la pression est réduite aux 3/4 de la pression ordinaire, la combustion devient assez languissante pour que la chaleur qu'elle dégage ne suffise plus pour la maintenir. Sur le Mont Blanc, où le baromètre ne s'élève qu'à $0^m,57$, M. de Saussure a observé que la combustion du charbon ne pouvait se maintenir qu'en l'alimentant avec un soufflet.

Enfin les vents ont, comme chacun le sait, une très grande influence sur le tirage de la cheminée, et leur action dépend du rapport entre leur vitesse et celle de la veine fluide qui s'échappe de la cheminée. Si la vitesse d'un vent dirigé du haut en bas était de 18 mètres par seconde il détruirait complètement le tirage d'une cheminée de 30 mètres de haut évacuant des gaz à 300°. Les vents ont rarement une semblable direction, ils sont toujours inclinés sur l'horizontale, et n'agissent sur le tirage que par leur composante verticale : mais lorsqu'une cheminée se trouve dominée par des édifices ou des montagnes, les vents ne se réfléchissant pas sur les surfaces qu'ils rencontrent, suivent ces surfaces et deviennent plongeants si leur direction sur l'horizon est de haut en bas.

Les vents extérieurs ont encore une influence très marquée sur l'efficacité de la combustion ; toutes les fois qu'ils sont dirigés en

Digitized by Google

sens contraire au mouvement de l'air appelé dans les foyers il y a ralentissement de la combustion. C'est surtout en marine que ce phénomène est le mieux et le plus facilement observé : des chaudières qui produisent suffisamment de vapeur en marchant *debout au vent*, deviennent insuffisantes *vent arrière*. Si deux batteries de chaudières sont placées en travers avec chaufferie commune ou accolées, il y en aura toujours une dont les foyers seront beaucoup plus actifs. Ce qui précède doit faire donner en marine la préférence aux batteries de générateurs placées suivant l'axe longitudinal du bateau, lorsque les circonstances particulières des aménagements le permettent.

Tirage artificiel. — Devant la dépense en combustible qu'entraîne le tirage appelé à tort *naturel*, et les inconvénients qu'il présente en raison des causes perturbatrices que nous venons d'analyser, on est conduit à se demander s'il n'y a pas d'autres moyens plus économiques et plus certains pour appeler dans les foyers le volume d'air nécessaire à la combustion.

Péclet a traité ce sujet d'une façon complète et avec la compétence qui lui est universellement reconnue.

« Lorsque le tirage, dit-il, est produit par une consommation de combustible et de chaleur, *la dépense est plus du quart du combustible employé*. Si nous n'avons pas les moyens d'utiliser autrement cette chaleur, le tirage naturel de la cheminée est alors admissible. Mais si cette chaleur peut servir pour le but de la vaporisation et si un tirage, *obtenu par des moyens mécaniques*, doit être moins coûteux, il nous sera plus avantageux d'employer ce tirage mécanique. »

Parmi d'autres preuves Péclet donne deux exemples qui constatent le fait ; le premier est le résultat obtenu à des bains chauds établis sur la Seine, à Paris : le travail produit par un seul homme avec le tirage *mécanique*, avait la même valeur que le travail de dix-sept hommes avec le *tirage naturel* dû à la chaleur du fourneau.

Le second exemple est celui d'une brasserie considérable où la puissance employée était de 200 chevaux. Dans cette brasserie, *un ventilateur mû par une puissance de six chevaux était suffisant*

Digitized by Google

pour produire un tirage égal à celui de la cheminée dépensant cinquante chevaux.

Péclet passe ensuite à l'examen de la valeur relative de tous les ventilateurs et il parvient à cette conclusion que l'on doit préférer le ventilateur à force centrifuge, à ailes planes et à mouvement excentrique. Le moyen d'application qu'il recommande à cet égard est indiqué à la figure 208, où par le moyen d'un ventilateur aspirant, les produits chauds sont dirigés dans le tuyau d'une cheminée ordinaire.

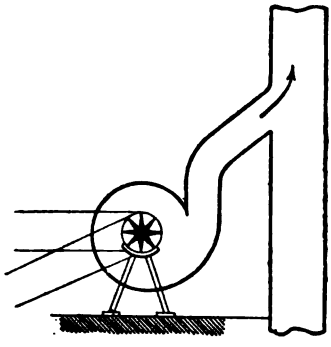


Fig. 208.

M. Ch. Williams (*Considérations sur la combustion du charbon*) a réalisé l'expérience suivante que nous croyons utile de consigner ici :

« La disposition, telle qu'elle est représentée dans la figure 209,

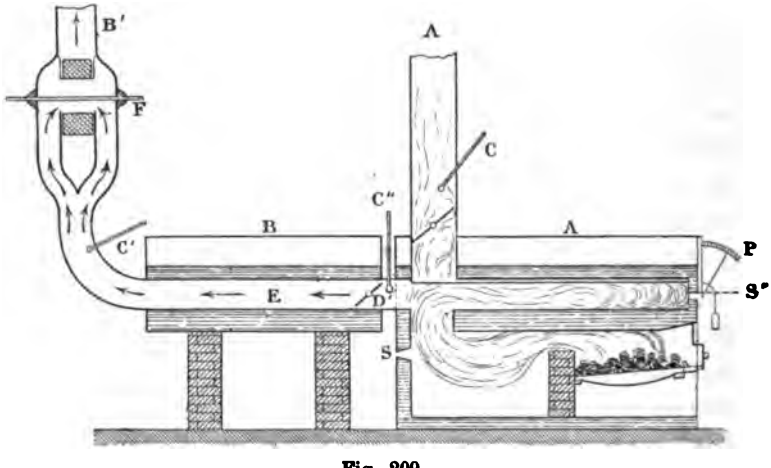


Fig. 209.

offrait, en même temps, les moyens de décider plusieurs points intéressants, relativement à la longueur du chemin à parcourir par la flamme, à la température effective du carneau, et celle des produits s'écoulant par la cheminée. Dans cette figure, A représente la chaudière, de $4^m,572$ de long, avec double carneau de retour à sa propre cheminée A', munie d'un thermomètre C et d'un

Digitized by Google

registre D ; un pyromètre d'Houldsworth P est mis en communication avec le carneau de retour le plus éloigné du fourneau. Deux regards avaient été pratiqués, l'un en S, à l'opposé du fourneau pour observer l'action de l'air introduit par la porte, et par la boîte à air placée au-dessus, comme nous l'avons déjà décrit ; l'autre S′, ouvert sur le carneau supérieur.

« Pour s'assurer de la possibilité de rendre utile la grande quantité de chaleur perdue par la cheminée, une chaudière auxiliaire B avait été réunie à la chaudière A au moyen du conduit de communication E ; elle était munie d'une cheminée séparée B′, avec un ventilateur aspirant, destiné à augmenter le tirage. Cette chaudière auxiliaire avait deux thermomètres C′ et C″ pour déterminer la température des produits gazeux, et un registre D′ disposé de manière à ce que l'on pût se servir à volonté, soit d'une seule chaudière, soit des deux à la fois.

EXPÉRIENCES AVEC LA CHAUDIÈRE AUXILIAIRE ET LE TIRAGE DU VENTILATEUR ASPIRANT

EXPÉRIENCES	CHARBON consommé par heure.	EAU vaporisée par heure.	EAU vaporisée par kilogr. de charbon.	INDICATION du pyromètre dans le carneau.	TEMPÉRATURE dans la cheminée.
	kilogr.	kilogr.	kilogr.	°C.	°C.
1° Tirage du ventilateur.	120,155	1112,680	9,26	551,66	343,33
2° Tirage ordinaire de la cheminée	97,484	703,700	7,21	385	210

« L'effet produit par le tirage du ventilateur n'a pas été seulement d'accroître la puissance d'évaporation de la chaudière *par heure*, dans le rapport de 703^{k},700 à 1 112^{k},680 d'eau, mais encore d'accroître la puissance d'évaporation de *chaque kilogramme de charbon employé*, dans la proportion de 7,21 à 9,26.

« Beaucoup d'autres expériences ont été faites, avec et sans le ventilateur, avec et sans la chaudière auxiliaire ; toutes ont confirmé la supériorité du tirage artificiel. »

La question de l'emploi de ventilateur aspirant pour produire le tirage a été à tort complètement délaissée : le mot ventilateur

Digitized by Google

effraye ingénieurs et industriels : ou le lie intimement aux questions de tirages forcés ou soufflés, avec le cortège d'inconvénients que l'application de ceux-ci a provoqués dans la production de la vapeur, inconvénients attribués à tort à l'allure du foyer et provenant uniquement des dispositions vicieuses adoptées généralement dans nos générateurs actuels, car, ainsi que nous l'avons vu, quelle que soit l'activité du foyer, la chaudière ne pourra pas en souffrir si la présence de l'eau est assurée sur les tôles de coup de feu. Mais en admettant même qu'une combustion très violente puisse être la source d'inconvénients, il est regrettable qu'on ait confondu de la sorte l'application des ventilateurs ou autres moyens mécaniques pour produire un tirage forcé, avec les mêmes appareils employés à l'obtention d'un tirage *naturel*[1].

En outre de l'économie réalisée sur la dépense de combustible, ce dispositif assure une bien meilleure utilisation de la chaleur contenue dans les produits de la combustion ; en permettant de diminuer les sections de passage, il permet de diminuer l'épaisseur des veines gazeuses et augmenter leur vitesse, conditions qui facilitent la transmission de la chaleur. Enfin les gaz, quittant la chaudière à une température supérieure à celle qui correspond à la pression de fonctionnement, peuvent être encore utilisés à l'échauffement de l'eau d'alimentation, et créer ainsi une nouvelle source d'économie.

[1] Voir la conférence de M. W. A. Martin, à l'*Institution of naval architects* sur les avantages du tirage mécanique par aspiration. (*Engineering* du 12 avril 1895.)

Digitized by Google

CHAPITRE XX

ÉPURATION ET FILTRAGE DES EAUX D'ALIMENTATION

Épuration. — Nous avons déjà signalé l'influence de la qualité de l'eau, pour la sécurité et le fonctionnement économique des générateurs de vapeur.

Une eau marquant plus de 25° à l'hydrotimètre doit être considérée comme impropre à l'alimentation des chaudières, sans avoir été au préalable épurée. L'épuration est généralement faite au moyen de procédés chimiques : les proportions et la nature des réactifs sont indiqués par les proportions et la nature des sels en dissolution dans l'eau à épurer. On emploie ordinairement la chaux pour les bicarbonates et la soude pour les sulfates.

Le procédé d'épuration le plus simple consiste à mélanger les réactifs a un volume d'eau représentant la consommation de 24 heures, et à la laisser reposer pour la décanter ensuite. Ce système, très simple, a l'inconvénient d'exiger des réservoirs de très grande capacité dès que les quantités de vapeur produites sont un peu importantes, et on lui préfère généralement le système d'épuration continue, réalisée dans de nombreux types d'appareils dont les plus répandus sont les épurateurs Howatson, Desrumeaux, Gaillet et Huet. Ceux-ci sont tous établis sur le même principe : entrée constante dans l'appareil d'un volume d'eau égal à celui consommé, mélange continu avec le réactif dans des proportions déterminées à l'avance, et essorage des précipités pendant le temps qu'une tranche liquide met à parcourir l'espace qui sépare l'entrée de la sortie de l'appareil. Le principal inconvénient de tous ces dispositifs réside dans leur automaticité. Les

Digitized by Google

débits d'eau variant, les quantités de réactifs mélangés restent les mêmes, et l'on envoie aux chaudières suivant le cas des eaux mal épurées ou chargées de réactifs. Le procédé par décantation est à employer de préférence si l'on dispose d'un espace suffisant pour l'établissement des réservoirs.

La meilleure mesure à prendre pour l'alimentation des générateurs est sans contredit l'emploi de l'eau distillée des condenseurs par surface, débarrassée des matières grasses et de l'air qu'elle contient. On réalise ainsi du même coup le maximum d'économie au moteur, en préservant la chaudière des incrustations : si l'on ne dispose pas d'un volume d'eau suffisant à la condensation il ne faudra pas hésiter à placer un appareil réfrigérant, pour réduire au minimum l'eau neuve destinée à parfaire les pertes. Le manque d'emplacement exige, comme en marine, l'emploi d'un appareil à distiller appelé *bouilleur* pour obtenir l'eau pure destinée à faire l'appoint. Là où la vapeur est employée à des procédés de chauffage on se trouvera dans des conditions excellentes en ramenant au générateur les eaux de purge des appareils de chauffage.

Nous reproduisons à cet effet une note que M. Dubiau a bien voulu rédiger pour nous et dont il a fait l'objet d'une communication à la Société Scientifique de Marseille.

Filtration des eaux industrielles. — A une époque encore peu éloignée, la nécessité de n'employer que des eaux parfaitement pures pouvait se limiter à un petit nombre d'industries exclusivement établies le long de quelques cours d'eau privilégiés.

Aujourd'hui, la bonne qualité des eaux industrielles est nécessaire dans toutes les régions ; le développement donné à l'emploi de la vapeur et surtout la création de certains types de générateurs rendent indispensable la pureté des eaux d'alimentation.

Malgré leur limpidité, les eaux de puits ne conviennent généralement pas aux usages industriels.

A Marseille, notamment, où ces eaux ne titrent jamais moins de 75 à 80 degrés hydrotimétriques, il est de toute nécessité d'éliminer les sels de chaux et de magnésie qu'elles contiennent en très forte proportion en dissolution.

Digitized by Google

Notre rapport à l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur pour l'année 1888 contient, au sujet de l'épuration chimique des eaux d'alimentation, des indications sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici [1].

Cette opération très simple et relativement rapide n'est cependant complète qu'à la condition de débarrasser l'eau traitée des matières étrangères rendues insolubles par l'emploi des réactifs.

Soit pour éviter le traitement chimique, soit pour en diminuer les frais, on emploie, autant qu'il est possible, les eaux de rivière toujours plus pures au point de vue de leur composition chimique, quelquefois même assez pures pour ne pas nécessiter d'autre traitement qu'une filtration mécanique destinée à les débarrasser des impuretés qu'elles tiennent en suspension.

Ainsi donc, dans la plupart des cas, les eaux dures tout aussi bien que les eaux douces sont souillées, les unes par le traitement chimique, les autres par les matières qu'elles entraînent, et toujours il est recommandable de les clarifier.

C'est cette deuxième partie de l'épuration complète que nous nous proposons d'examiner.

La clarification des eaux s'obtient de deux manières : par *décantation* et par *filtration*.

Le premier procédé, qui utilise au repos le classement naturel par ordre de densité des matières qui se trouvent à l'état de mélange, exige beaucoup de temps et de grandes surfaces : deux conditions qui rendent cette méthode rarement pratique dans l'industrie.

Ainsi, alors que la réaction chimique ne demande que deux heures pour être complète à la température ambiante (elle est beaucoup plus rapide si on la produit à une température élevée), la décantation par le repos absolu n'exige jamais moins de dix heures, et certaines eaux sont encore imparfaitement décantées, même après vingt-quatre heures de séjour dans les réservoirs.

[1] L'emploi de la soude, qui reste toujours soluble, a l'inconvénient de rendre les eaux alcalines, et la concentration de ce sel dans les générateurs nuit à la conservation des cuivres. L'épuration par l'*aluminate de baryte* que nous essayons actuellement est un procédé trop nouveau pour qu'il nous soit possible de le juger encore ; mais nous sommes heureux de signaler ce nouveau réactif dont le grand avantage serait de ne donner que des composés insolubles.

Digitized by Google

On conçoit que l'énorme quantité de réserves qui résulte de ces faits ait forcé à rechercher des moyens plus prompts d'obtenir, même à des conditions un peu onéreuses, des eaux propres au fur et à mesure des besoins.

Avant d'aborder le filtrage proprement dit, signalons sommairement quelques moyens qui ont eu pour objet d'activer la décantation. Ils ont été de deux ordres ; chimiques et mécaniques.

Les premiers sont connus sous le nom de méthode par englobement, ils consistent : soit à provoquer des dépôts floconneux qui se précipitent plus rapidement, ou gélatineux, en utilisant leur viscosité pour englober les impuretés en suspension. Ces effets sont produits par l'aluminate de soude et le sulfate d'alumine.

Les procédés mécaniques consistent à faire circuler le liquide en couches minces sur des surfaces aussi développées que possible.

Presque tous les appareils automatiques d'épuration d'eau d'alimentation des chaudières, emploient ce système à la sortie de la bâche de réaction.

Nous en citerons quelques-uns pour leurs variétés.

Le dispositif *Howatson* est composé d'une série de chicanes formée par des troncs de cônes concentriques.

Son effet est de diviser une colonne d'eau, animée d'un mouvement ascensionnel, en lui opposant des surfaces obliques.

Les procédés employés dans les appareils *Gaillet et Huet*, *Boone et Nory*, sont analogues (fig. 210). Des cloisons planes ont pour objet d'allonger considérablement le cheminement de l'eau.

L'obliquité donnée à ces cloisons favorise la décantation et permet en outre de recueillir les dépôts en de nombreux points pour les expulser en quelque sorte au fur et à mesure de leur formation.

Dans l'épurateur *Desrumeaux*, l'eau préalablement traitée suit un double parcours vertical à travers une colonne composée de deux cylindres concentriques.

Le mouvement descendant du mélange à travers le cylindre central permet d'abandonner à la partie inférieure les impuretés les plus lourdes, le liquide remonte ensuite par l'espace annulaire,

Digitized by Google

mais en suivant une chicane tronco-hélicoïdale munie elle-même de cloisons verticales formant autant de cuvettes. Toutes ces poches, destinées à retenir les dépôts les plus légers, sont raccordées à des conduites d'extraction.

Signalons enfin le mode de décantation appliqué par *M. Brunon* dans sa méthode d'épuration à haute température. L'idée de mul-

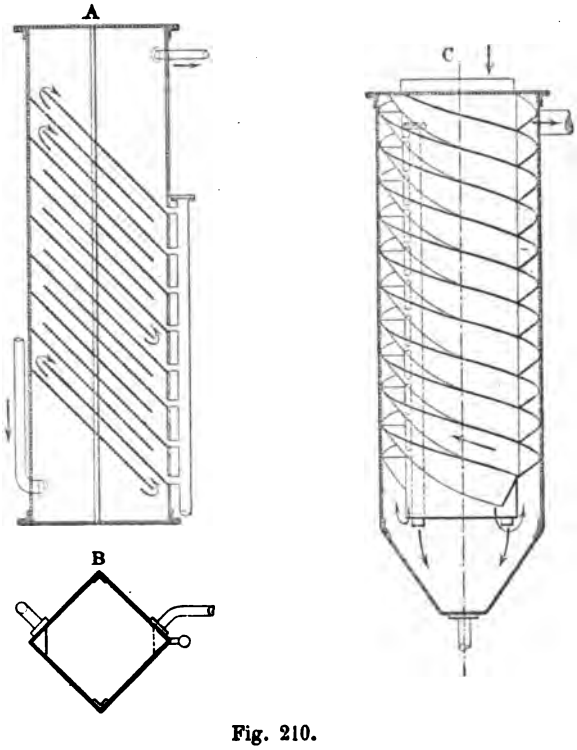


Fig. 210.

tiplier les surfaces de contact a été très simplement réalisée en faisant circuler l'eau en nappe sur des lits de tournure de fer.

Tous ces appareils ont plus spécialement pour objet l'épuration de l'eau d'alimentation des générateurs, et on est forcé de reconnaître que, pour cette application du moins, leur efficacité est souvent insuffisante. Elle dépend de la vitesse du liquide sur les surfaces ménagées à cet effet, et, soit mesure d'économie dans les frais d'installation première, soit excès du débit prévu, la vitesse convenable est fréquemment dépassée. Aussi, beaucoup d'épurateurs doivent être munis, en outre, d'un filtre.

Digitized by Google

La *filtration*, qui consiste à faire passer un liquide à travers une masse poreuse destinée à en retenir les impuretés, n'exige pas nécessairement que les espaces ménagés dans la masse filtrante et qui constituent le passage libre, soient réduits aux dimensions des particules à retenir.

Ce serait une erreur de vouloir ainsi assimiler le tamisage de l'eau au criblage mécanique d'une matière granulaire à travers des mailles plus ou moins serrées.

Un filtre ainsi constitué ne fonctionnerait que quelques instants à moins d'être pourvu d'un moyen de nettoyage continu.

Le filtrage appliqué à de grandes masses d'eau ne saurait être, si je puis m'exprimer ainsi, qu'un *essuyage* de l'eau.

Et, pour compléter la comparaison éveillée par ce mot, je ferai observer que toutes les dispositions que je viens de rappeler ont le même but : *frotter* les poussières en suspension dans la masse liquide.

D'où la nécessité d'obtenir une extrême division de l'eau, afin de mettre les souillures en contact avec les corps solides contre lesquels elles frotteront d'abord et auxquels elles finiront par adhérer, soit par un ralentissement graduel de la vitesse, soit par attraction capillaire.

Ce phénomène est mis en évidence dans les conduites d'eau : les dépôts sédimentaires se forment sur tout le développement des parois. Leur épaisseur à la partie inférieure n'est plus considérable que parce que les produits de la décantation naturelle viennent, en ces points, s'ajouter aux matières déjà retenues par simple frottement.

Envisagé ainsi, le filtrage n'est donc qu'une application beaucoup plus complète du principe de la décantation artificielle qui a donné naissance aux divers appareils que nous venons de citer et auxquels, malgré la circulation de l'eau, on conserve le nom de « décanteurs ».

Les systèmes de filtres sont extrêmement nombreux ; ils varient autant par leurs dispositions, que par la nature des matières filtrantes employées. Mais, eu égard au débit à obtenir, on peut les diviser en trois grandes catégories :

Digitized by Google

1re Les filtres pour usages domestiques ;

2e Les filtres pour usages industriels ;

3e Enfin les filtres appliqués dans les grands centres, soit à la distribution d'eau, soit à la clarification des eaux d'égouts avant leur déversement dans les rivières.

C'est de la deuxième catégorie, correspondant au débit moyen, que nous nous occupons ici et, en particulier, au point de vue de l'alimentation des chaudières à vapeur.

Indépendamment de l'efficacité, l'industrie recherche dans un filtre trois conditions essentielles :

Une durée de fonctionnement qui n'exige des nettoyages qu'à de longs intervalles ;

Une faible résistance au passage de l'eau ;

Enfin, une marche rapide qui permette de réduire autant que possible ses dimensions d'encombrement.

La matière filtrante a, dès l'origine, donné lieu à de nombreuses recherches.

Aux matériaux de formation naturelle mis à contribution, il faut ajouter une longue nomenclature de produits manufacturés. Citons principalement parmi les matières poreuses : certains calcaires, le grès, la pierre ponce, les escarbilles, le charbon de bois, certains produits céramiques, les éponges.

Parmi les matières granulaires :

Le gravier, le sable, le verre pilé, la sciure de bois, le noir animal.

Parmi les matières fibreuses : la paille, le coton, l'étoupe, la laine, le crin, le papier, divers tissus, le feutre.

Les premiers appareils étaient presque invariablement composés d'un récipient dont le fond perforé supportait des couches superposées de matériaux à interstices graduellement resserrés en allant vers le sommet. L'eau arrivait par le haut et se recueillait sous le fond perforé.

Le principal défaut de ce système était d'abandonner tous les dépôts sur la couche la plus dense et comme conséquence de déterminer une obstruction rapide.

Les améliorations recherchées dans ce système primitif au moyen de la pression d'eau ou d'air n'ont pas modifié sensible-

Digitized by Google

ment ni surtout économiquement les résultats obtenus avec l'écoulement naturel de l'eau.

En conservant cette disposition, l'idée de donner à l'eau une direction ascensionnelle fut un heureux perfectionnement. Non seulement il était plus rationnel de n'opposer des obstacles de plus en plus resserrés qu'à des eaux de moins en moins chargées, mais, en outre, l'adhérence des matières plus lourdes était combattue par la gravité, tandis que dans le premier cas, la pesanteur contribuait au contraire à la formation d'un colmatage compact.

Le procédé de la méthode descendante a néanmoins continué à être appliqué avec quelques ingénieuses dispositions qui permettent de retarder l'obstruction de la couche filtrante, et qu'il est intéressant de citer.

Le filtre *Farquhar* n'employait comme matière filtrante qu'une couche granulaire homogène, sable ou sciure de bois ; un plateau fixé sur un arbre creux tournait continuellement au-dessus de cette couche avec laquelle il était en contact. Des canaux ménagés dans ce plateau distribuaient uniformément l'eau à filtrer qui arrivait par l'arbre creux. Une lame de rabot correspondant à une rainure radiale recueillait les sédiments en les faisant passer à la partie supérieure, le plateau pouvait en même temps prendre un mouvement de descente très lent et lorsque l'eau à traiter contenait des dépôts vaseux pénétrant assez profondément dans la couche filtrante, la lame enlevait en même temps la matière souillée.

En résumé, le procédé Farquhar consiste en un nettoyage continu pouvant se régler automatiquement.

A fond de course, il est indispensable de renouveler entièrement la matière filtrante.

M. Howatson emploie, dans certains cas, un filtre à sable à marche descendante. Il remplace le plateau à rabot du système Farquhar par une herse rotative manœuvrée de temps en temps à la main. Les dents sont montées sur chaque bras de façon à chevaucher les sillons. Le sable n'est changé que lorsqu'il est sali sur toute l'épaisseur de la couche.

MM. Delhotel et Moride ont encore simplifié le procédé de net-

Digitized by Google

toyage de la couche filtrante. Leur procédé consiste à distribuer l'eau brute par des ajutages disposés de façon à imprimer à la masse un mouvement giratoire dont l'effet est de maintenir en suspension les dépôts qui, par leur extrême ténuité, provoqueraient l'engorgement de la matière filtrante. Un dévaseur recueille ces dépôts à la partie centrale.

Tous ces procédés, en dépit de leur ingéniosité ou de leur simplicité, ne sont après tout que des palliatifs ne remédiant que partiellement à la méthode de filtrage par courant descendant.

Il est évident que lorsqu'il s'agit de séparer d'une eau troublée des matières qui peuvent s'éliminer par décantation, le courant ascendant est le plus rationnel.

Nous verrons tout à l'heure, d'ailleurs, que ces améliorations sont encore applicables à ce dernier procédé.

Les eaux d'alimentation n'entraînent pas que des matières lourdes. Sans parler de l'emploi de certains réactifs qui produisent des écumes dont il faut se débarrasser, souvent les condensations réutilisées entraînent avec elles des corps gras provenant de leur passage à travers les organes lubrifiés des moteurs ou des pompes. Dans certains cas, dans la marine notamment où les eaux d'alimentation sont relativement pures, on a dû appliquer des filtres spéciaux pour empêcher l'entrée dans les chaudières de ces matières grasses.

On sait d'ailleurs que l'isolement provoqué par les dépôts huileux sur les tôles chauffées est beaucoup plus grave que celui produit par les dépôts calcaires.

Pour les raisons qui doivent faire préférer la marche ascendante de l'eau qu'on désire dépouiller des matières lourdes, la marche descendante doit être appliquée lorsqu'il s'agit de retenir des matières flottantes.

L'urgente nécessité d'éliminer les corps gras a donné lieu à une nouvelle série d'applications de filtrage.

Nous allons décrire rapidement les appareils fonctionnant à l'air libre ou sous pression, suivant qu'ils sont placés avant ou après le refoulement des pompes alimentaires.

Le plus simple, fréquemment employé à terre, consiste à divi-

Digitized by Google

ser le réservoir qui reçoit l'eau à la sortie du condenseur par des cloisons perforées. Le but de ces cloisons est d'amener l'eau à prendre un niveau tranquille qui permette aux matières légères de se dégager à la surface où elles trouvent un conduit d'écumage.

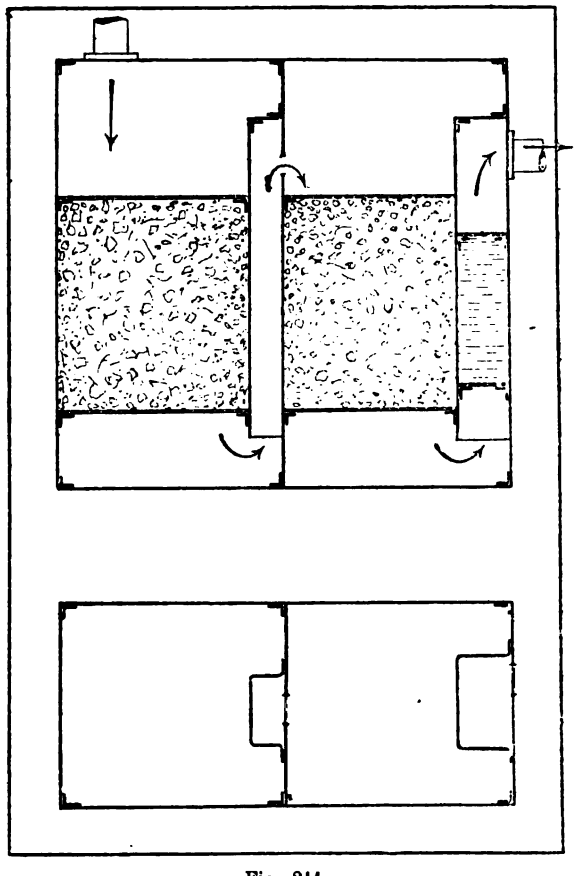


Fig. 211.

Une disposition similaire s'emploie en ajoutant du coke dans les compartiments de la bâche. Les résultats à obtenir sont plus certains, mais il faut avoir soin de retenir les parcelles de coke qui, entraînées par l'eau, causeraient le grippement des pompes.

La *Compagnie des Transports Maritimes* a fait construire pour son usage un filtre à graisse basé sur ce principe (fig. 211). Les cloisonnements donnent à l'eau quatre changements de direction.

Digitized by Google

Les deux parcours descendants sont utilisés pour traverser une épaisse couche de coke ; seul le dernier parcours montant est muni d'un filtre en déchets de coton pour arrêter les poussières de coke entraînées.

On a pu constater ainsi, que plus encore que les sédiments les corps gras obéissent à la loi d'adhérence aux surfaces rugueuses qu'ils rencontrent.

M. Drory, ingénieur en chef de la Compagnie des Forges et Chantiers de la Méditerranée, a réussi à augmenter encore l'action de ce dispositif en remplaçant le coke par de la tournure de fer, qui, sous un même volume, développe de plus grandes surfaces de contact.

Un long essai fait par la Compagnie des Transports Maritimes a démontré l'efficacité de ce procédé.

La maison *Normand et Cie* a fait breveter, pour l'enlèvement des corps gras, un modèle de bâche, dans lequel la matière filtrante est composée d'une série de lits d'éponges reposant chacun sur un grillage (fig. 212).

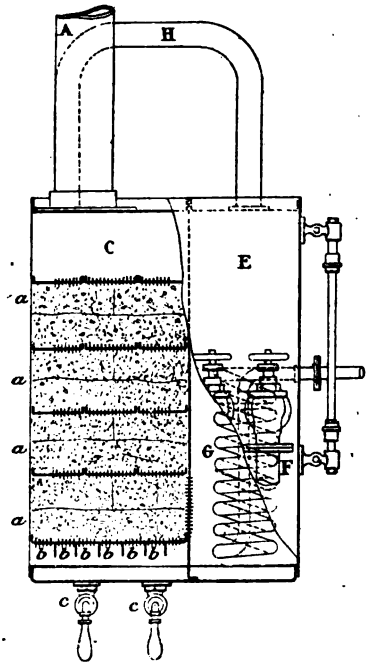


Fig. 212.

Le but de cette disposition est d'empêcher les éponges supérieures de comprimer les lits inférieurs et de leur conserver leur perméabilité. Les résultats obtenus sont excellents. L'éponge par son élasticité oppose une faible résistance au passage de l'eau, mais ses bonnes qualités filtrantes n'ont qu'une durée assez limitée et le coût de cette matière rend le procédé Normand d'un prix relativement élevé.

Les appareils que je viens de citer sont tous placés sur la conduite d'aspiration, c'est-à-dire avant les pompes. Or l'expérience m'a personnellement fait reconnaître que beaucoup d'installations

Digitized by Google

de pompes alimentaires permettent d'amener de l'huile de graissage dans les chaudières en quantité dangereuse. Les pompes verticales à fourreau mues par excentriques sont particulièrement vicieuses sous ce rapport.

Il ressort de cette observation que la position d'un filtre à corps gras doit être choisie de préférence entre les pompes et les chaudières, c'est-à-dire sur le refoulement.

Cet emplacement exige, il est vrai, des appareils plus résistants que les premiers puisqu'ils doivent être soumis à une pression intérieure au moins égale à la pression de la vapeur.

C'est sur ce principe qu'est basé le filtre Edmiston. C'est une application, à ce cas particulier, du filtre-presse généralement employé pour le clairçage.

L'appareil se compose d'une série de châssis en flanelle maintenus entre des plaques perforées et des grilles métalliques au travers desquelles les graisses sont expulsées.

Un jeu de valves convenablement disposées permet d'isoler le filtre pour le nettoyage en marche.

L'idée de faire tournoyer le liquide que nous avons vu employer dans les filtres Delhotel et Moride pour maintenir les matières vaseuses en suspension vient d'être appliquée tout récemment dans le filtre à huile *Drakenberg* (fig. 213). Comme le précédent, cet appareil est placé au refoulement. Ce dispositif très simple et fort ingénieux est conçu, dans sa forme et dans ses dimensions, de façon à résister, sans atteindre un grand poids, à la pression qu'il doit supporter.

L'eau injectée par la pompe arrive dans un cylindre vertical en traversant les orifices d'une turbine fixe qui imprime à l'eau un mouvement giratoire. L'huile se maintient à la partie supérieure et un tube plongeant jusqu'à la surface du ménisque vient l'en extraire en même temps que l'air en excès. Le fonctionnement continu se règle simplement par le robinet de vidange.

Dans les diverses applications que nous avons examinées jusqu'à présent, nous avons rencontré, en dehors des corps granulaires, des matières filtrantes qui semblent mieux remplir les conditions d'un bon filtrage, la laine tontine, les déchets de coton, les éponges.

Nous n'avons pas signalé encore l'emploi du feutre. Cette

Digitized by Google

matière nous paraît cependant bien mieux répondre aux besoins que nous avons envisagés.

Le feutre de poils n'a pas, comme les déchets de laine et de coton, l'inconvénient de se tasser, il a une durée supérieure à celle des éponges et enfin il coûte relativement très bon marché.

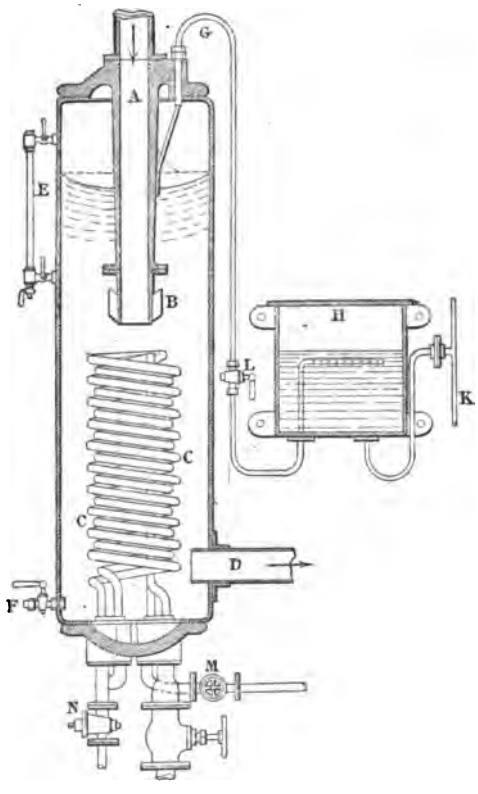


Fig. 213.

Ce produit a d'ailleurs été employé pour la filtration des eaux industrielles et nous allons en examiner quelques applications.

L'appareil Burck est assez complexe. Il fait passer l'eau dans une bâche dont le fond est formé d'une toile de feutre sans fin, mobile sur des rouleaux.

Une disposition mécanique permet de le nettoyer par simple compression et lui conserve sa perméabilité. L'épaisseur de la couche filtrante est nécessairement fort réduite, aussi donne-t-elle

Digitized by Google

un débit considérable : 15 mètres cubes par heure et par mètre carré. Nous n'avons pas vu cet appareil en fonctionnement et si nous sommes assez disposé à admettre le débit annoncé il est permis d'avoir des doutes sur son pouvoir filtrant.

Mon regretté collègue, M. Bour, signalait, en 1890, dans le *Bulletin de l'Association lyonnaise*, une application de filtrage par les feutres fort employée en Suisse (fig. 214).

Ce filtre se compose de boudins creux formés par superposition de couronnes découpées dans des planches de feutre. Le filtrage se fait de l'extérieur à l'intérieur, de sorte que les premières impuretés se déposent à la périphérie, par consé-

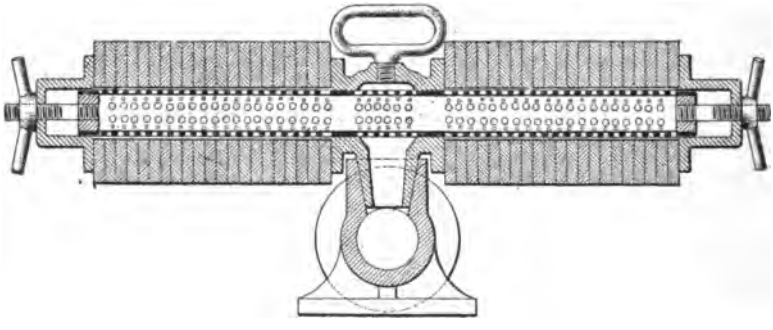


Fig. 214.

quent sur la surface filtrante qui offre le plus de passage au liquide.

L'idée n'est pas nouvelle, d'ailleurs ; elle a été mise en pratique, il y a plus de vingt ans, dans l'épurateur *Letellier*. Dans ce dernier appareil, les rondelles étaient maintenues verticalement autour de tubes perforés. Ces tubes, munis de plateaux à la partie supérieure, étaient vissés par l'autre extrémité à la première plaque d'un double fond ; on obtenait, par ce mode d'assemblage, la compression nécessaire des feutres.

Dans les deux dispositions, on voit que la dépense d'installation est assez élevée ; les montures sont en effet de véritables pièces mécaniques, tournées et ajustées. Or, la précision des assemblages et l'emploi de filetages ne sont pas pratiques dans les milieux résiduels où ces pièces doivent séjourner, surtout lorsqu'on a recours au traitement chimique.

Digitized by Google

Nous avons cherché à simplifier l'application de ce procédé, à le rendre moins coûteux et nous avons très facilement réussi à n'employer que des pièces brutes sur lesquelles les dépôts ne présentent pas d'inconvénient.

La monture destinée à maintenir le cylindre de feutre et à le comprimer peut être extérieure ou intérieure.

La monture extérieure a été préférée pour le filtre horizontal placé au fond d'une bâche de réaction, soit qu'elle desserve une

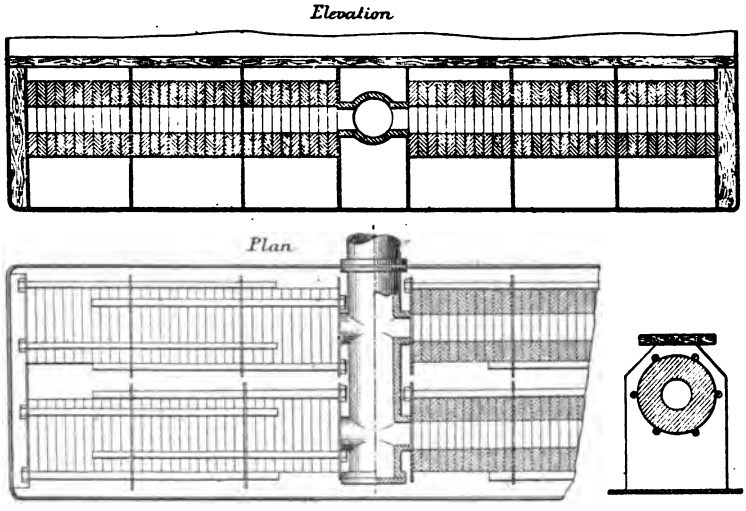


Fig. 215.

caisse d'alimentation, soit qu'elle porte elle-même le branchement de l'aspiration des pompes.

Chaque élément (fig. 215) est essentiellement composé de deux plaques extrêmes portant chacune trois tringles équidistantes. Le chevauchement des six tiges doit déterminer un hexagone circonscrivant les rondelles de feutre. Il suffit d'insérer au tiers environ de la longueur occupée par les feutres, deux nouvelles plaques munies de trous livrant passage aux tiges pour constituer un élément rigide tranversalement, mais compressible dans le sens de la longueur.

Naturellement, toutes ces plaques, sauf la dernière, sont découpées au centre comme les feutres pour livrer passage à l'eau filtrée.

Digitized by Google

Le filtre ainsi composé est comprimé à la main (cette pression est suffisante) entre la prise de l'aspiration et la paroi opposée de la bâche quand on n'emploie qu'un seul élément. Si le débit à obtenir est plus considérable, il suffit de multiplier le nombre

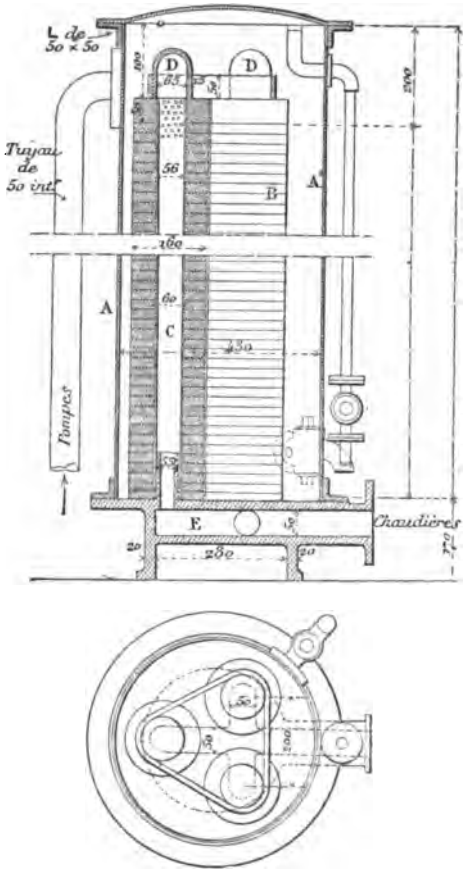


Fig. 216.

d'éléments en les plaçant comme il vient d'être dit contre autant de tubulures ménagées sur une conduite générale.

Nous avons eu l'occasion d'expérimenter avec succès ce montage avec des éléments de deux mètres de longueur développant chacun un mètre carré de surface filtrante extérieure correspondant à un débit d'un mètre cube par heure.

La monture intérieure a été réalisée plus simplement encore, et

Digitized by Google

nous l'avons utilisée pour des filtres verticaux destinés surtout à retenir les huiles sous le refoulement des pompes.

Un tube central (fig. 216) est formé par l'enroulement d'une tôle perforée de blutoir et galvanisée ensuite[1]. Une collerette en tôle mince est rivée à la partie inférieure ; elle sert, d'une part à maintenir les couronnes empilées de feutre qui recouvrent le tube sur presque toute sa longueur et aussi à faire joint sur le fond du récipient par l'interposition d'une ou deux rondelles filtrantes. Enfin, un chapeau en fonte qui surmonte le tube en le guidant agit directement par son poids (15 kilos environ) pour maintenir les feutres sous une compression constante.

Ce dernier montage est assez clairement représenté dans la figure pour éviter de plus longues explications. Par l'adjonction d'un jeu des robinets à trois voies, on pourra, à volonté, isoler le filtre en cours de service ou même renverser le sens de son fonctionnement pour opérer des nettoyages partiels pendant la marche.

Disons d'ailleurs que lorsque les feutres ne sont souillés que par des matières terreuses, ils sont susceptibles de réemploi après lavage. Il suffit de les soumettre à des compressions répétées sous un courant d'eau dirigé de la partie centrale à la périphérie.

[1] Toutefois un tube perforé en cuivre est plus recommandable ; certaines eaux très aérées provoquent sur la lanterne en fer des corrosions par pustules à action très rapide.

Digitized by Google

Digitized by Google

CATALOGUE DE LIVRES

SUR LA

MÉCANIQUE ET LES MACHINES

PUBLIÉS PAR

LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue complet est envoyé sur demande.

Portefeuille des machines.

Portefeuille économique des machines, de l'outillage et du matériel, relatifs à la construction, à l'industrie, aux chemins de fer, aux routes, aux mines, à la navigation, à l'électricité, etc.; contenant un choix des objets les plus intéressants des expositions industrielles; fondé par OPPERMANN. 12 livraisons par an formant un beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte. Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements et Belgique, 18 fr. — Union postale. . . . . 20 fr.
Prix de l'année parue, reliée . . . . . 20 fr.

Agenda Oppermann.

Agenda Oppermann, paraissant chaque année. Élégant carnet de poche contenant tous les chiffres et tous les renseignements techniques d'un usage journalier. Rapporteur d'angles, coupe géologique du globe terrestre, guide du métreur. — Résumé de géodésie. — Poids et mesures, monnaies françaises et étrangères. — Renseignements mathématiques et géométriques. — Renseignements physiques et chimiques. — Résistance des matériaux. — Électricité. — Règlements administratifs. — Dimensions du commerce. — Prix courants et série de prix. — Tarifs des Postes et Télégraphes.

Relié en toile, 3 fr.; en cuir, 5 fr. — Pour l'envoi par la poste, 25 c. en plus.

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer,

Digitized by Google

machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Édition française du Manuel de la Société « Hütte », par PHILIPPE HUGUENIN. 1 beau volume contenant plus de 1200 pages, avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin . . . . . 15 fr.

Mécanique appliquée.

Cours élémentaire de mécanique appliquée, à l'usage des écoles primaires supérieures, des écoles professionnelles, des écoles d'apprentissage, des écoles industrielles, des cours techniques et des ouvriers, par BOCQUET, ingénieur, directeur de l'École Diderot. 2e édition. 1 volume in-12, relié . . . . . 5 fr.

Construction mécanique.

Les éléments de la construction mécanique. Bois, fonte, fer, aciers et trempe des outils, métaux divers et alliages, travail des métaux, outils, machines-outils, boulons, rivets, clavettes, courroies, cordages, câbles métalliques, graissage, peinture, par J. BUCHETTI, ingénieur, E.-C. Paris. A.-M. Aix, ex-constructeur, ex-professeur suppléant à l'École centrale. 1 vol. in-4°, avec 80 figures et 17 planches, dont une en couleurs. 12 fr.

Mécanique appliquée.

Manuel de mécanique appliquée, par DWELSHAUVERS. 1re partie : Cinématique. 1 volume in-8°, avec 12 planches . . . . . 5 fr.

Physique.

Physique, par GARIEL, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur de physique à la Faculté de médecine et à l'École nationale des ponts et chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 20 fr.

Étude des combustibles.

Contribution à l'étude des combustibles; détermination industrielle de leur puissance calorifique, par R. MAHLER, ingénieur civil des mines. 1 volume in-4° avec figures dans le texte et 2 planches. . . . . 5 fr.

Air comprimé.

Traité élémentaire de l'air comprimé, par JOSEPH COSTA, ingénieur civil, ancien élève de l'École Polytechnique. 1 volume grand in-8°, avec 20 figures dans le texte.. . . . . 5 fr.

Air comprimé ou raréfié.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 francs la livraison.

Machines à comprimer l'air, installées aux mines de Lens, avec 2 planches. Livraison de juin 1887. . . . . 2 fr.

Machine à air raréfié, système Petit et Boudenoot, avec 1 planche. Livraison de février 1888 . . . . . 2 fr.

Digitized by Google

Compresseur d'air, système Burckhardt et Weiss, avec 3 planches. Livraison d'août 1888. . . . . 2 fr.

Compagnie parisienne de l'air comprimé, procédés Victor Popp. Principes et théorie, production de l'air comprimé, canalisation, emploi comme force motrice. Livraison de septembre, octobre et novembre 1891. 6 fr.

Compresseur d'air vertical à quatre phases de compression et à réservoir intermédiaire de M. Elwell fils, avec 1 planche. Livraison d'août 1894 . . . . . 2 fr.

Chaudières à vapeur.

Traité pratique des chaudières à vapeur employées dans les manufactures, par DENFER, chef de travaux graphiques à l'École centrale des arts et manufactures. 1 volume grand in-4°, accompagné de 81 planches cotées et en couleur. . . . . 50 fr.

Chaudières à vapeur.

N.-B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 francs la livraison.

Chaudière tubulaire demi-fixe à déjecteur et sécheur de Lencauchez, avec une planche. Livraison de janvier 1877. . . . . 2 fr.

Chaudières à vapeur, système Bède, avec 1 planche. Livraison de mars 1881 . . . . . 2 fr.

Chaudière à bouilleurs verticaux, système Grenier-Chevalier, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1883 . . . . . 2 fr.

Chaudières semi-tubulaires accouplées, système Dulac, avec une planche. Livraison de janvier 1884. . . . . 2 fr.

Générateurs à vapeur, système Bordone, avec 1 planche Livraison de mai 1884 . . . . . 2 fr.

Chaudière d'embarcation, système Cadiat, avec 1 planche. Livraison de septembre 1885 . . . . . 2 fr.

Chaudière multitubulaire, système Collet, avec 1 planche. Livraison de février 1886 . . . . . 2 fr.

Chaudières du paquebot *la Champagne*, de la Cie Transatlantique, avec 2 planches. Livraison de septembre 1886. . . . . 2 fr.

Installation d'une batterie de générateurs à vapeur, système Dulac, avec 1 planche. Livraison de décembre 1887. . . . . 2 fr.

Chaudière inexplosible, système Terme et Deharbe, avec 1 planche. Livraison de mars 1888. . . . . 2 fr.

Chaudière multitubulaire inexplosible, système Lagosse et Bouché, avec 1 planche. Livraison de juillet 1888 . . . . . 2 fr.

Chaudière multitubulaire, système Oriolle, avec 1 planche. Livraison de septembre 1888 . . . . . 2 fr.

Générateur inexplosible, système Pressard. Livraison de février 1890 . . . . . 2 fr.

Note sur les chaudières multitubulaires à petits éléments, avec 1 planche. Livraison de janvier 1891 . . . . . 2 fr.

Chaudière à vapeur multitubulaire à tubes curvilignes, à circulation automatique et dilatation libre, système Durenne et Krebs, avec 1 planche. Livraison de mai 1892 . . . . . 2 fr.

Expériences sur les coups de feu des chaudières à vapeur, avec 1 planche. Livraison de mars 1893. . . . . 2 fr.

Digitized by Google

Analyse des essais de chaudières effectuées par MM. BRYAN DONKIN et KENNEDY, avec 1 planche. Livraison de juillet 1893 . . . . . 2 fr.
Chaudière à vapeur, système H. Martin. Livraison de janvier 1894. 2 fr.

Épreuves des chaudières à vapeur.

Note sur les épreuves des chaudières à vapeur, suivie de la loi du 21 juillet 1856, concernant les contraventions aux règlements sur les appareils et bateaux à vapeur et la loi du 18 juillet 1892 fixant les nouvelles taxes d'épreuves des appareils à vapeur et leur mode de perception, par H. MATHIEU, contrôleur des mines. 1 brochure grand in-8° . . . . . 1 fr. 50

Le tirage forcé.

Note sur le tirage forcé et son application aux chaudières marines, par MAURICE DEMOULIN, ingénieur. 1 brochure in-8° . . . . . 1 fr.

Manuel du chauffeur-mécanicien.

Manuel du chauffeur-mécanicien et du propriétaire d'appareils à vapeur, par HENRI MATHIEU, garde-mines, inspecteur des appareils à vapeur de la Seine, professeur au syndicat général des chauffeurs-mécaniciens. 1 volume grand in-8°, avec 409 figures dans le texte. . . . . 16 fr.

L'A B C du chauffeur.

L'A B C du chauffeur, petit guide pratique écrit spécialement à l'usage des ouvriers de la corporation par M. HENRI MATHIEU, contrôleur des mines, avec une Introduction par M. C. Walckenaer, ingénieur des mines, 1 volume in-32, relié. . . . . 3 fr.

Traité de la machine à vapeur.

Traité de la machine à vapeur. Description des principaux types et théorie; étude, construction, conduite et applications, par ROBERT H. THURSTON, directeur du « Sibley College » Cornell University, ancien président de « l'American Society of Mechanical Engineers », traduit de l'anglais et annoté par MAURICE DEMOULIN. 2 volumes in-8° avec de nombreuses figures dans le texte. Relié . . . . . 60 fr.

Construction des machines à vapeur.

Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines. Résumé des connaissances actuellement acquises sur la machine à vapeur, considérations relatives au type de machine et aux proportions à adopter, détermination des dimensions et des proportions des principaux organes, étude et construction de ces organes, par MAURICE DEMOULIN, ingénieur. 1 volume grand in-8°, avec 483 figures dans le texte. Relié . . . . . 20 fr.

Essais de machines et chaudières à vapeur.

Manuel pratique des essais de machines et chaudières à vapeur, par ROBERT H. THURSTON, directeur du « Sibley College » Cornell University, ancien président de « l'American Society of Mechanical Engineers », ancien ingénieur de la marine aux États-Unis, traduit de l'anglais par

Digitized by Google

AUGUSTE ROUSSEL, ancien élève de l'École polytechnique et de l'École nationale supérieure des mines. Un volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. Relié . . . . . 25 fr.

Essai des machines.

Guide pour l'essai des machines. Ouvrage contenant tout ce qui a rapport aux indicateurs, l'analyse des diagrammes, le travail indiqué, les freins de Prony ordinaires et automatiques, les dynamomètres de transmission, les essais de vaporisation, les proportions des générateurs et cheminées, etc., par J. BUCHETTI, ingénieur E. C. Paris, A. M. Aix, ex-constructeur, ex-professeur suppléant à l'École centrale. 2e édition, 1 vol. in-8°, avec 180 figures dont 28 pl., relié. . . . . 15 fr.

Machines à vapeur.

Les machines à vapeur actuelles. Traité complet de construction de tous les systèmes de machines, le calcul de leurs organes au point de vue de la puissance à développer, de la régularité du fonctionnement et de leur résistance propre, par J. BUCHETTI, ingénieur E. C. Paris, A. M. Aix, ex-constructeur, ex-professeur suppléant à l'École centrale. 1 vol. in-4° avec 170 figures et 13 petites planches et l'atlas in-folio de 62 planches. 60 fr.

SUPPLÉMENT A L'OUVRAGE CI-DESSUS : Machines simples, compound, à triple expansion, à vitesse normale, à grande vitesse. 1 volume in-4° et 1 atlas in-folio de 20 planches. . . . . 30 fr.

Machines à vapeur.

Les machines à vapeur à l'Exposition universelle de Paris en 1889, par J. BUCHETTI, ingénieur E. C. Paris, A. M. Aix, ex-constructeur, ex-professeur suppléant à l'École centrale. 1 volume in-4° avec 53 figures dans le texte et 1 atlas in-folio de 40 planches. . . . . 50 fr.

Machines à vapeur.

Traité théorique et pratique des machines à vapeur au point de vue de la distribution. — Méthode générale des gabarits, permettant d'établir des épures approchées ou exactes de tous les types de machines. — Étude méthodique des principales distributions au double point de vue de leur fonctionnement et de leur construction, par COSTE et MANIQUET. 2e édition. 1 volume grand in-8° contenant 53 figures intercalées dans le texte et 1 atlas grand in-4° de 46 planches de dessins exactement réduits à l'échelle et cotés. . . . . 25 fr.

Machines à vapeur.

Étude sur les machines à vapeur. Moteurs à vapeur, pour les petites industries et moteurs à vapeur de grandes dimensions, à l'exposition des arts et métiers de Vienne (Autriche), 1888, par A. GOUVY FILS, ingénieur des arts et manufactures. 1 brochure in-8°, avec 3 grandes planches et 16 figures dans le texte. . . . . 4 fr.

Machines à vapeur.

Les machines à vapeur à triple et quadruple expansion et les progrès récents des appareils de navigation, par MAURICE DEMOULIN, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8° avec 5 planches. . . . 5 fr.

Digitized by Google

Machines à vapeur.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 francs la livraison.

Machine à vapeur demi-fixe de la force de 12 chevaux, avec 1 pl. Livraison de juin 1876. . . . . 2 fr.

Machine motrice à pilon, de 6 chevaux, avec parallélogramme, du yacht à vapeur *le Furet*, avec 2 planches. Livraison de septembre 1876. 2 fr.

Machine à vapeur horizontale de la force de 20 chevaux, à détente variable et à condensation, avec 1 planche. Livraison de mai 1877. 2 fr.

Machine à vapeur compound de 100 chevaux des bateaux Hirondelles Parisiennes, avec 1 planche. Livraison d'août 1877. . . . . 2 fr.

Machine locomobile de la force de 20 chevaux, type adopté par la marine de l'État, avec 1 planche. Livraison d'août 1877. . . . . 2 fr.

Machine à vapeur horizontale, système Corliss, de la force de 50 chevaux avec 2 planches. Livraison de novembre 1877. . . . . 2 fr.

Machine à vapeur compound de 120 chevaux à cylindre verticaux, à balancier, et détente variable Correy, avec 1 planche. Livraison de février 1878 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur horizontale de 60 chevaux, système Corliss, à détente variable au régulateur, avec 1 planche. Livraison d'août 1878. . . 2 fr.

Machine à vapeur horizontale de 15 chevaux, système Sulzer, avec distribution à soupapes et déclic avec 1 planche. Livraison de février 1879 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur de 150 chevaux, type Corliss, construite par le Creusot, avec 2 planches. Livraisons de juin et de juillet 1885 . . . . 4 fr.

Moteur domestique à vapeur de 1 cheval, système Davey. Livraison de juillet 1885. . . . . 2 fr.

Moteur à vapeur de 2 chevaux, système Friedrich, avec 1 planche. Livraison de juin 1886. . . . . 2 fr.

Moteur à vapeur de 4 chevaux, système Salomon et Tenting, avec 1 planche. Livraison de juillet 1886 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur horizontale compound de 40 chevaux, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1886 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur à triple expansion pour canot à grande vitesse, avec 2 planches. Livraison de décembre 1886 . . . . . 2 fr.

Machines à vapeur Woolf à 2 cylindres à simple effet, avec 1 planche. Livraison de février 1888 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur compound de 400 chevaux, système Wheelock, avec 2 planches. Livraison d'avril 1889. . . . . 2 fr.

Machine à vapeur de 80 chevaux montée sur truck, système Bourdon, avec 1 planche. — Machine à vapeur à triple expansion de 150 chevaux de Boulet et Cie, avec 1 planche. Livraison de décembre 1890. . . . 2 fr.

Machine à vapeur compound, système Bonjour, avec 2 planches. Livraison de juin 1891 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur à condensation de 140 chevaux, système Bonnefond, avec 1 planche. Livraison de mars 1892 . . . . . 2 fr.

Recherches expérimentales sur le régime économique des machines marines ; résultats d'essais officiels effectués sur le steamer *Iona*, avec 1 planche. Livraison de janvier 1892. . . . . 2 fr.

Machine à vapeur système Blondel, avec alternateur-volant, système Patin, pour usines productrices d'énergie électrique, avec 2 planches.

Digitized by Google

Livraison d'août 1893. . . . . 2 fr.

Note sur le tracé pratique des diagrammes prévus daus les machines à vapeur à expansions fractionnées, avec 1 planche. Livraison d'avril 1894 . . . . . 2 fr.

Machines à vapeur à grande vitesse.

N. B. Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent avec la livraison qui les renferme, aux prix de 2 fr. la livraison.

Machine à vapeur à grande vitesse, système Raffard, avec 1 planche. Livraison d'avril 1887. . . . . 2 fr.

Machine à vapeur à grande vitesse, système Armington et Sims, avec 1 planche. Livraison de septembre 1888. . . . . 2 fr.

Turbine à vapeur compound ou turbo-moteur Parsons. Livraison d'avril 1889 . . . . . 2 fr.

Machine à vapeur à grande vitesse, système Hoffmann, avec 1 planche. Livraison d'avril 1890. . . . . 2 fr.

Turbine à vapeur, système de Laval. Livraison de juillet 1894. . 2 fr.

Indicateur des machines.

L'indicateur du travail et du fonctionnement des machines à piston à vapeur, à eau, à gaz, etc. et son diagramme, par Von Pichler, traduit par R. Seguela, ancien élève de l'École polytechnique, inspecteur au chemin de fer du Nord. 1 volume in-8°, avec 46 figures dans le texte. . . 5 fr.

Enveloppes de vapeur.

Recherches expérimentales sur l'emploi des enveloppes de vapeur et du fonctionnement compound dans les locomotives effectuées sur les chemins de fer sud-ouest russes, par A. Borodine, ingénieur en chef du matériel et de la traction. 1 volume grand in-8°, avec 3 grandes planches. . . . 6 fr.

Transport de la vapeur.

Le transport de la vapeur à grandes distances et sa canalisation. Renseignements théoriques et pratiques, condensation dans les tuyaux, enveloppes calorifuges, établissement des conduites, prix de revient des tuyaux, par Chretien. 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte . 2 fr.

Locomotives.

Note sur la construction des locomotives en Angleterre, par Maurice Demoulin, ingénieur des arts et manufactures. 1 brochure grand in-8°, avec 2 grandes planches . . . . . 3 fr.

Locomotives.

La machine-locomotive. Manuel pratique donnant la description des organes et du fonctionnement de la locomotive, à l'usage des mécaniciens et des chauffeurs, par Sauvage, ingénieur en chef-adjoint du Matériel de la Traction de la Cie de l'Est. 1 volume in-8°, avec 284 figures dans le texte. Relié . . . . . 5 fr.

Locomotives.

Les locomotives à l'Exposition universelle de 1878, par A. Mallet. —

Digitized by Google

Locomotives françaises et étrangères. — Machines à voyageurs. — Machines à marchandises. — Machines pour services spéciaux. — Locomotives pour voie étroite. 1 volume in-8°, avec 2 grandes planches et 1 tableau. 5 fr.

Locomotives.

Étude sur l'utilisation de la vapeur dans les locomotives et l'application à ces machines du fonctionnement compound, par A. MALLET. 1 volume in-8°, avec tables et planches . . . . . 7 fr.

Locomotives.

Développement de l'application du système compound aux machines locomotives, par A. MALLET. 1 volume in-8°, avec 3 planches. . . 5 fr.

Locomotives.

Locomotives à adhérence totale pour courbes de petit rayon, par A. MALLET. 1 brochure grand in-8°, avec trois planches. . . . . 4 fr. 50

Locomotives.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison :

Locomotive compound à 4 roues couplées, système Mallet, avec 1 planche. Livraison de janvier 1878. . . . . 2 fr.

Locomotive pour voie étroite de 0,75 du chemin de fer d'Ocholt à Westerstede (Oldenbourg), avec 1 planche. Livraison de mai 1878 . . 2 fr.

Locomotive à tiroirs cylindriques et à soupapes de rentrée d'air du réseau de l'État, avec 1 planche. Livraison de juillet 1884. . . . 2 fr.

Locomotive compound, système Webb, de la Cie des chemins de fer de l'Ouest, avec 2 planches. Livraison du 4 décembre 1884. . . . . 2 fr.

Locomotive à voyageurs des chemins de fer de l'État belge, avec 2 planches. Livraison de décembre 1885 . . . . . 2 fr.

Locomotive à marchandises du Pensylvania Railroad, avec 1 planche. Livraison de juillet 1887 . . . . . 2 fr.

Locomotive à 4 roues couplées du South-Eastern Railway, avec 2 planches. Livraison d'octobre 1889. . . . . 2 fr.

Étude comparative sur les principaux types de bogies appliqués aux locomotives, avec 2 planches. Livraisons de février et de mars 1890 4 fr.

Locomotive compound à 6 roues couplées du Great-Eastern Railway et locomotive compound à roues indépendantes du North-Eastern Railway, avec 2 planches. Livraison de juin 1890 . . . . . 2 fr.

Locomotive à 4 roues couplées et à bogie du chemin de fer de l'Ouest, avec 1 planche. Livraison d'avril 1891 . . . . . 2 fr.

Note sur les locomotives employées en Angleterre pour le remorquage de banlieue, avec 2 planches. Livraison de janvier 1893 . . . . 2 fr.

Locomotive-remorqueur pour tramways, système Brown, avec 1 planche. Livraison de novembre 1878 . . . . . 2 fr.

Locomotive à eau chaude, système Francq, avec 1 planche. Livraison de janvier 1883 . . . . . 2 fr.

Locomotive de tramway, système Roy, avec 1 planche. Livraison de novembre 1884 . . . . . 2 fr.

Locomotive à air comprimé, système Mekarski, pour le Métropolitain de Paris, avec 1 planche. Livraison de juillet 1886. . . . . 2 fr.

Digitized by Google

Traction à vapeur sans feu, système Francq et Lamm, pour le Métropolitain de Paris, avec 1 planche. Livraison d'août 1886. . . . . 2 fr.

Locomotives à voyageurs des chemins de fer de l'Etat, avec 1 planche. Livraisons de mars, avril et mai 1893 . . . . . 6 fr.

Chauffage des locomotives au moyen des résidus de pétrole, avec 1 planche. Livraison de février 1885 . . . . . 2 fr.

Locomotive-tender compound, système Mallet, de la Compagnie des Chemins de fer du sud de la France, avec 1 planche. Livraison de juin 1893 . . . . . 2 fr.

Locomotive compound à 4 cylindres et à grande vitesse de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1893 2 fr.

Moyens d'empêcher la rupture des longerons et les avaries des chaudières de locomotives, et construction de foyers en acier doux. Livraison de mai 1894. . . . . 2 fr.

Locomotive express du New-York central and Hudson railroad. — Locomotive tender à dix roues accouplées, pour le tunnel de Saint-Clair. Livraison d'août 1894. . . . . 2 fr.

Locomotive des tramways de la Drôme (voie de 1 mètre), avec 1 planche. Livraison de mai 1894 . . . . . 2 fr.

Distribution de vapeur.

Étude géométrique des principales distributions en usage dans les machines à vapeur fixes, par CORNUT, ingénieur en chef de l'Association des propriétaires de machines à vapeur du nord de la France. 1 volume in-8° de texte et 1 atlas in-4° de 31 planches . . . . . 15 fr.

Distribution de vapeur.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison :

Moyen de tenir rigoureusement compte de l'obliquité des bielles dans les épures de distribution, avec 1 planche. Livraison de mars 1890. 2 fr.

Note sur la distribution à changement de marche, de M. N. Fouquemberg, avec 2 planches. Livraison de novembre 1891 . . . . . 2 fr.

Distribution à tiroirs cylindriques indépendants pour l'admission et l'échappement appliqué aux locomotives, par Lencauchez et Durant, avec 1 planche. Livraison de janvier 1892. . . . . 2 fr.

Note sur l'emploi des distributions à 4 obturateurs dans la marine. Livraison de juin 1893. . . . . 2 fr.

Distribution « Buckeye », avec 1 planche. Livraison de juin 1894 2 fr.

Régulateurs.

Théorie et description des régulateurs marins isochrones, à bras et à bielles croisés à deux centres d'oscillation, de MM. FARCOT et ses fils, par HUIN. 1 brochure in-8°, accompagnée de figures dans le texte et de 4 grandes planches gravées. . . . . 3 fr.

Servo-Moteur.

Le servo-moteur ou moteur asservi, par FARCOT. Ses principes constitutifs, variantes diverses, application à la manœuvre des gouvernails. 1 volume in-8°, avec 37 planches . . . . . 4 fr.

Digitized by Google

Moteurs à gaz.

Traité théorique et pratique des moteurs à gaz ; gaz de houille, gaz pauvres, air carburé (pétroles) et de leurs applications diverses à l'industrie, la locomotion et la navigation, contenant des détails sur l'installation et l'entretien des moteurs à gaz et suivi d'un tableau résumé de l'industrie du pétrole, par GUSTAVE CHAUVEAU, ingénieur civil, lauréat de la Société technique de l'industrie du gaz en France. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 15 fr.

Moteurs à gaz et à pétrole.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison :

Moteur à gaz à air dilaté, système Langen et Otto, avec 2 planches. Livraisons d'avril et de mai 1876 . . . . . 4 fr.

Moteur à gaz, système de Bischop, avec 1 planche. Livraison de mars 1877 . . . . . 2 fr.

Moteurs à gaz Otto, de 8 chevaux, à 2 cylindres, avec 2 planches. Livraison de février 1884. . . . . 2 fr.

Moteur à gaz de 2 chevaux, système Koerting-Lieckfeld, avec 1 planche. Livraison de novembre 1886 . . . . . 2 fr.

Moteur à gaz « Simplex », système Delamarre-Deboutteville et Malandin, avec 1 planche. Livraison de novembre 1890. . . . . 2 fr.

Moteur à gaz, système Benz, avec 1 planche. Livraison de janvier 1891 . . . . . 2 fr.

Moteur à gaz, à détente complète variable par le régulateur, système L. Charon, avec 1 planche. Livraison de décembre 1891. . . . . 2 fr.

Note sur le moteur à gaz système Crossley. Livraison de septembre 1892 . . . . . 2 fr.

Moteur à pétrole, système Diedrichs, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1892. . . . . 2 fr.

Moteur de 2 chevaux, à air carburé, système Lenoir, avec 1 planche. Livraison de mars 1888. . . . . 2 fr.

Machines thermiques.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison.

Machine à air chaud, système Brown, avec 1 planche. Livraison de février 1883 . . . . . 2 fr.

Machine thermique, système Gardie, avec 1 planche. Livraison d'août 1886 . . . . . 2 fr.

Moteur à air chaud de 9 chevaux, système Benier, avec 2 planches. Livraison de décembre 1888 . . . . . 2 fr.

Traité des machines-outils.

Traité des machines-outils par GUSTAVE RICHARD, membre du Conseil de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale et du Comité de la Société des ingénieurs civils. 2 volumes grand in-4° avec de nombreuses figures dans le texte. Relié. . . . . 150 fr.

Digitized by Google

Le tome premier contenant : *tours*, *alésoirs*, *raboteuses*, *mortaiseuses*, *étaux limeurs*, *raineuses et perceuses*, avec 3.022 figures, vient de paraître. Le tome II est à l'impression et paraîtra fin 1895.

Machines-outils.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison.

Machine à raboter et à percer les traverses de chemins de fer de Frey fils et Ch. Donnay, avec 1 planche. Livraison de mai 1876. . . . 2 fr.

Grande machine à raboter à plateau mobile de 6 mètres de course et 2 mètres de largeur de Bouhey, avec 1 planche. Livraison de mai 1876 . . . . . 2 fr.

Cisaille à vapeur double des forges de Styrum. Livraison de juin 1876 . . . . . 2 fr.

Grande cisaille à double bielle pour la tôle d'acier, de fer ou de cuivre, de Ferron, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1876 . . . . . 2 fr.

Grand tour en l'air avec plateau de 3 mètres de diamètre, avec 1 planche. Livraison de juillet 1877 . . . . . 2 fr.

Grande machine radiale à percer et fraiser de $2^m,50$ de rayon maximum, pour flasques de chaudières, etc., avec 1 planche. Livraison de mai 1878 . . . . . 2 fr.

Machine à mortaiser avec porte-outil s'inclinant à volonté, avec 1 planche. — Machine à mortaiser à colonne et à retour rapide, avec 1 planche. Livraison de juillet 1878. . . . . 2 fr.

Machine à planer les tôles, avec 1 planche. — Machine à cintrer et raboter les champs des douelles des tonneaux, avec 1 planche. Livraison de mars 1880 . . . . . 2 fr.

Cisaille à couper les tôles de longueurs et largeurs illimitées, avec 1 planche. Livraison de janvier 1881. . . . . 2 fr.

Cisaille à queue à vapeur à action directe, avec 1 planche. Livraison de février 1881 . . . . . 2 fr.

Machine à raboter le bois, avec 1 planche. Livraison d'août 1882. 2 fr.

Machine à fraiser universelle, avec 1 planche. Livraison de janvier 1884 . . . . . 2 fr.

Machine à percer et à mortaiser le bois, avec 1 planche. Livraison de janvier 1884. . . . . 2 fr.

Machine à fraiser universelle de Brown et Sharpe. Livraison de mars 1884 . . . . . 2 fr.

Machine à percer de Frey, avec 1 planche. Livraison d'avril 1886 2 fr.

Alésoir automatique, système Frager, avec 1 planche. Livraison de septembre 1886. . . . . 2 fr.

Machine à emboutir les métaux minces, avec 1 planche. Livraison d'avril 1888 . . . . . 2 fr.

Machines-outils électro-magnétiques, avec 1 planche. Livraison de juillet 1888 . . . . . 2 fr.

Machine à sertir les boîtes sans soudures, avec 1 planche. Livraison de juillet 1889 . . . . . 2 fr.

Machine à raboter de James Yate Johnson, avec 1 planche. Livraison d'avril 1890. . . . . 2 fr.

L'outillage du vélocipède. Machines Hillman, Herbert et Cooper pour la

Digitized by Google

fabrication des roues et des billes de vélocipèdes, avec 2 planches. Livraison de juillet 1892. . . . . 2 fr.

Machines à percer les trous polygonaux. Livraisons de janvier et février 1893. . . . . 4 fr.

Tour à rectifier de Bouhey fils, avec 1 planche. Livraison de mai 1893. . . . . 2 fr.

Machine à aléser simultanément dans le sens longitudinal et dans le sens transversal les cylindres et bâtis de machines à vapeur, avec 1 planche. Livraison d'août 1893 . . . . . 2 fr.

Foreuse pour canons, avec 1 planche. Livraison de novembre 1893 2 fr.

Presse hydraulique, système Huber, pour recouvrir de plomb les câbles électriques, avec 2 planches. Livraison d'avril 1894 . . . . . 2 fr.

Machine à tailler automatiquement les objets en verre, cristal, etc., système Gauchot, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1894 . . . . . 2 fr.

Machine à river, à course variable, par transmission liquide, à pression croissante, système Husson, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1894. . . . . 2 fr.

Engrenages.

Étude théorique et pratique sur les engrenages, par ALBERT HUGON, ingénieur. 1 volume in-8°, avec 74 figures dans le texte et deux planches 5 fr.

Graissage.

Étude sur le graissage des cylindres et tiroirs des machines à vapeur et sur les matières lubrifiantes, par R. SEGUELA. 1 volume grand in-8°, avec 6 planches . . . . . 6 fr.

Hydraulique.

Mécanique appliquée : Hydraulique, par A. FLAMANT, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur à l'École centrale des arts et manufactures et à l'École nationale des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 130 figures dans le texte . . . . . 25 fr.

Moteurs hydrauliques.

Les moteurs hydrauliques actuels. (Roues et Turbines.) Traité théorique et pratique, par J. BUCHETTI, ingénieur, E. C. Paris, A. M. Aix, ex-constructeur, ex-professeur suppléant à l'École centrale.

1re *Partie :* Calculs et conditions d'établissement. 1 vol. in-4° avec 115 figures dans le texte . . . . . 20 fr.

2e *Partie :* Construction. 1 vol. in-4° avec 55 figures dans le texte et 1 atlas in-folio de 40 planches. . . . . 50 fr.

Les deux parties prises ensemble. . . . . 60 fr.

Élévation des eaux.

Traité de l'élévation des eaux. Calculs et renseignements pratiques. Pompes à main. — Emploi des moteurs à vent et à eau. — Pompes centrifuges. — Emploi des moteurs à vapeur, à gaz électriques. — Pompes d'alimentation. — Appareils hydrauliques. — Ascenseurs. — Emploi de

Digitized by Google

l'air et des gaz comprimés. — Pulsomètres. — Injecteurs. — Éjecteurs. — Béliers hydrauliques, par P. BERTHOT, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8° avec 350 figures dans le texte. Relié. 18 fr.

Pompes.

Les pompes centrifuges et rotatives. Théorie pratique, construction, installation, par J. BUCHETTI, ingénieur, E. C. Paris, A. M. Aix, ex-constructeur, ex-professeur suppléant à l'École centrale. 1 volume grand in-8° avec 35 figures dans le texte et 10 grandes planches. . . . . 10 fr.

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

89089673537
B89089673537A

Digitized by Google

Digitized by Google

89089673537

b89089673537a

Digitized by Google